

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de la Reconstrucción Digital de Imágenes Holográficas para Su Aplicación a Ensayos No Destructivos

Fabio Miguel Vincitorio

Directores:

Dr. Alberto Ramil Rego

Dra. Ana Jesús López Díaz

**Departamento de Ingeniería Industrial II
Programa de Doctorado en Ingeniería Industrial**



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Ferrol, Septiembre de 2014



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

SOLICITUDE DE AUTORIZACIÓN PARA A DEFENSA DA TESE DE DOUTORAMENTO

Doutorando/a	Fabio Miguel Vincitorio		
Enderezo (rúa, número, piso...)	Alem 34 Of. 4 PA		
Localidade	Paraná – Entre Ríos Argentina	Código postal	3100
Enderezo electrónico	fabio@vzingeneria.com.ar	Teléfono	0054-343-4218213

SOLICITA ao Departamento / Instituto/ Comisión Académica Ingeniería Industrial II responsable do programa Ingeniería Industrial
autorización para a defensa da tese de doutoramento:

Título	Desarrollo de la Reconstrucción Digital de Imágenes Holográficas Para Su Aplicación a Ensayos No Destructivos		
Director/es	Alberto Ramil Rego Ana Jesús López Díaz		
Tese inscrita no programa de doutoramento dende o curso académico 2007			
Opta ao Doutoramento Internacional?	No		
Idioma/s da lectura	Español	Idioma da presentación	Español
PROGRAMA DE DOUTORAMENTO REALIZADO:			
Denominación	Ingeniería Industrial		
Centro / Departamento / Instituto	Ingeniería Industrial II - Escuela Politécnica Superior		
Universidade	Universidade Da Coruña		
Orden reguladora	RD 185/1985 <input type="checkbox"/>	RD 778/1998 <input checked="" type="checkbox"/>	RD 1393/2007 <input type="checkbox"/> RD 99/2011 <input type="checkbox"/>
Curso acad. de inicio	2007	Curso acad. final	2008
		Data obtención DEA/ Suf. Inv./ Título Mestrado Universitario Oficial	22/01/2009

En Ferrol a 2 de septiembre de 2014

Asinado: Alberto Ramil Rego

Ana Jesús López Díaz

Sr/a Director/a do Departamento / Instituto Universitario de Ingeniería Industrial II

Resumen

La holografía inventada conceptualmente por el Ingeniero Húngaro Denis Gabor tiene dos etapas de desarrollo bien definidas. Inicialmente, a partir del desarrollo del láser, la técnica para la obtención de hologramas se sustentaba en el uso de placas fotográficas. Pasados más de 50 años, la existencia de ordenadores de alta capacidad y gran integración, así como la evolución de los dispositivos electrónicos de captura de imágenes, han permitido una reinención de los conceptos definidos por Gabor.

En esta tesis se plantea la utilización de ambos métodos de captura, fotográficos y digitales, para su uso en interferometría holográfica como método de ensayo no destructivo. Los principios físicos fundamentales y sus correspondientes modelos matemáticos son el punto de partida de este trabajo. A partir de la utilización de estos se avanza sobre el uso de simulaciones para definir los parámetros de los que depende la formación de las franjas sobre el interferograma. Paralelamente se documentan aplicaciones de la HI (holografía interferométrica) aplicada a problemas concretos de ingeniería. Así, son documentadas la existencia de tensiones residuales, fracturas y los diferentes modos de excitación del objeto bajo estudio.

Inicialmente en HI y posteriormente en HID (holografía interferométrica digital) mostraron en determinados tipos de aplicaciones, serias limitaciones en cuanto a la cantidad de información que podía obtenerse de ellos. La información perdida o la pérdida de selectividad espacial son el objetivo central de esta tesis. Mediante simulación y derivada de la observación dinámica de los HI se plantean una serie de reglas que permiten recuperar dicha información. Mediante simulaciones computacionales se definen las condiciones necesarias para establecerlas.

Finalmente modelos de combinación de HI y HID junto a una serie de aplicaciones específicas de HID sobre objetos analizados previamente por HI cierran el conjunto de temas comprendidos en este trabajo.

Resumo

A holografía inventada conceptualmente polo Enxeñeiro Húngaro Denís Gabor ten dúas etapas de desenvolvemento ben definidas. Inicialmente, a partir do desenvolvemento do láser, a técnica para a obtención de hologramas sustentábase no uso de placas fotográficas. Pasados máis de 50 anos, a existencia de ordenadores de alta capacidade e grande integración, así como a evolución dos dispositivos electrónicos de captura de imaxes, permitiron unha reinvención dos conceptos definidos por Gabor.

Nesta tese fórmulase a utilización de ambos os dous métodos de captura, fotográficos e dixitais, para o seu uso en interferometría holográfica como método de ensaio non destrutivo. Os principios físicos fundamentais e os seus correspondentes modelos matemáticos son o punto de partida deste traballo. A partir da utilización destes avánzase sobre o uso de simulacións para definir os parámetros dos que depende a formación das franxas sobre o interferograma. Paralelamente documéntanse aplicacións da HI (holografía interferométrica) aplicada a problemas concretos da enxeñaría. Así, son documentadas a existencia de tensións residuais, fracturas e os diferentes modos de excitación do obxecto baixo estudo.

Inicialmente en HI e posteriormente en HID (holografía interferométrica dixital) mostraron en determinados tipos de aplicacións, serias limitacións en canto á cantidade de información que podía obterse deles. A información perdida ou a perda de selectividade espacial son o obxectivo central desta tese. Mediante simulación e derivada da observación dinámica dos HI fórmulanse unha serie de regras que permiten recuperar a devandita información. Mediante simulacións computacionais defínense as condicións necesarias para establecelas.

Finalmente modelos de combinación de HI e HID xunto a unha serie de aplicacións específicas de HID sobre obxectos analizados previamente por HI pechan o conxunto de temas comprendidos neste traballo.

Abstract.

Holography was created by the Hungarian engineer Denis Gabor and has two well defined stages. In the beginning laser light and high definition photographic materials were used to obtain a hologram. Nowadays, the large integration of electronics and recently developed software resulted in a new way to do holography. The use of computers and CCD cameras helps us to obtain a similar level of information in shorter periods of time. Digital holography was developed following the same methodology as in conventional holography.

In this thesis, both photographic and digital methods are used to implement non-destructive testing based on holographic interferometry (HI). Mathematical and physical concepts are the starting point to introduce holographic applications. Computational simulations are used to explain the meaning of the fringes in HI and allow us to recreate different phenomena on bounded conditions. This thesis presents a work performed on different samples evaluating the existence of residual stress and cracks, using different methods to induce deformation on the sample under study.

The principal aim of this thesis is to find the information that is "lost" when three-dimensional deformation occurs on the sample during a free deformation process (i.e. thermal expansion). Results allowed us to put together a protocol to follow during experiments that, using specific arrangements and dynamic image reconstruction, lets us recover successfully all the information contained in HI or HID .

Dedicado a mis maestros

Ángel, Aurora, Carlos, Mary, Ramiro y Luis.

Agradecimientos.

El trabajo aquí plasmado es el esfuerzo de 6 años de labores que no hubiesen sido posibles sin el apoyo de mis colegas y estudiantes. Cada uno de ellos ha brindado su colaboración incondicional para llevar adelante las diferentes experiencias que dieron lugar a los contenidos aquí expuestos. No queda más que agradecer la participación del Ing. Arturo Casano como director de los ingenieros Hernan Barrera y Diego Siboldi, quiénes desarrollaron y plasmaron las ideas para la construcción de piezas mecánicas usadas en los automatismos. A su vez, es mérito de ellos la implementación mediante MEF de los modelos de simulación usados como contraste de las experiencias holográficas, habiendo sabido plasmar cada una de las inquietudes oportunamente planteadas.

A mis estudiantes; Emanuel Boaglio, Lisandro Figueroa, Nicolás Bellini y Cecilia Mulone quiénes desde sus jóvenes inquietudes generaron interrogantes a ser resueltos, participando activamente de cada una de las experiencias.

A mis colegas: Nicolás Budini, Carlos Freyre, Julio Gervasoni y María Paula Fiorucci, quiénes siempre supieron aportar ideas y recursos para llevar adelante esta tarea.

A Ramiro Prodan de ELT Argentina, que me permitiera el ingreso a esta empresa y la donación de materiales para la realización de ensayos.

Un particular agradecimiento a la UDC y a la UTN por brindarme el espacio para la realización de esta tesis doctoral.

A quién fuera el impulsor de mi voluntad, D. Armando Yáñez Casal, particularmente por haberme brindado tempranamente una oportunidad que ha sido la más valiosa en el desarrollo de mi carrera.

Por demás está agradecer lo invaluable, a mis directores Alberto Ramil Rego y Ana Jesús López Díaz.

Finalmente no puedo dejar de agradecer a mi esposa Mariela Doce. A mis hijos, Bruno, Franco y Julián, quiénes sacrificaron parte de si para que pudiera llevar adelante este proyecto.

Prologo

Desde los inicios de la humanidad nuestra especie ha tenido una necesidad innata de representar el mundo que nos rodea. Una realidad tridimensional que desde nuestros primeros días hemos sido capaces de observar pero que nos ha llevado milenios obtener las capacidades necesarias para poder reproducir.

Para los artistas de las diferentes culturas, el llevar al plano algo que es netamente espacial fue una obsesión y a la vez una barrera insuperable a lo largo del tiempo.

Jovanni Battisti en el siglo XI, mediante el desarrollo de la perspectiva permite por primera vez reconocer profundidad en un plano, salvando de alguna manera la barrera impuesta por la estructura bidimensional. Hasta ese momento, toda representación espacial era volcada en un plano sin otra posibilidad que la imaginación del observador para darle un marco real.

A finales del siglo XIX la invención de la fotografía abrió toda una nueva era, de una vez y para siempre se podían retratar instantes únicos, personas reales, paisajes o documentos que podían ser guardados en forma casi inmediata.

De la mano de la fotografía llegó la estereoscopia, una técnica con la cual el observador podía ver una imagen tridimensional, mediante el “engaño” al sentido de la vista y el cerebro.

Sin embargo no fue hasta 1948 en que el ingeniero húngaro Denis Gabor, vio en la difracción de Rayos X y en la matemática de Fourier el mecanismo para lograr alcanzar el sueño de los artistas. Salvador Dalí imaginó toda una nueva era para el arte a partir de la holografía, pensando sin dudas que abriría un campo inexplorado de posibilidades a los artistas del futuro. Sin embargo pasados ya casi 30 años de sus pensamientos, esta técnica, ha tomado un rumbo muy diferente. Es a partir de las posibilidades de aplicación mediante ensayos no destructivos a la preservación del patrimonio cultural, donde se ha logrado el nexo más fuerte con el arte.

Hoy el desarrollo de la electrónica, de las cámaras de CCD y los ordenadores individuales con una gran capacidad de procesamiento, nos permite obtener las primeras imágenes holográficas digitales. La reducción de los tiempos de procesamiento de los hologramas y el análisis directo de los interferogramas, abren un campo de aplicaciones impensado hace algunos años, salvando los principales obstáculos de la holografía fotográfica.

En un futuro no muy lejano y de la mano de la nanotecnología no deberemos extrañarnos de encontrarnos con la realidad de lo que el cine de ciencia ficción nos ha hecho imaginar.

Índice general.

Capítulo I: Introducción y objetivos	27
1. Introducción.....	27
1.1. Holografía.....	27
1.2. Interferometría holográfica.....	27
1.3. Registro holográfico.	28
1.4. Aplicaciones a ensayos no destructivos.....	29
2. Objetivos.....	29
2.1. Cómo se organiza este trabajo.	30
 Capítulo II: Metodología	33
1. Holografía.....	33
1.1. Conceptos generales de la holografía.	33
1.2. Coherencia.....	35
1.3. Difracción de la luz, el origen de la imagen holográfica.	35
1.4. Holografía, reconstrucción de los frentes de onda.....	37
1.4.1. Holograma en línea de Gabor.	37
1.4.2. Holograma fuera de línea o de Leith- Upatnieks.....	39
1.4.3. Holograma de Fourier sin lentes.....	42
1.5. Reconstrucción de la imagen.....	43
1.6. Speckle.	46
1.6.1. Descripción del speckle.	46
1.7. Práctica de la holografía.	47
1.7.1. Holograma de haz directo.....	47
1.7.2. Hologramas de haz dividido.	49
1.7.3. Elementos necesarios para la práctica de la holografía	50
1.7.4. El esquema óptico.....	56
1.7.5. Simulaciones computacionales como método complementario en la holografía.	57
1.8. Principios generales de la holografía digital.....	57
1.8.1. Reconstrucción numérica mediante la aproximación de Fresnel.....	58
1.8.2. Reconstrucción numérica por aproximación de convolución.....	59
1.8.3. Reconstrucción numérica por Fourier.	60

1.9.Práctica de la holografía digital.....	61
1.9.1.Desarrollo del algoritmo de reconstrucción de la imagen.	62
1.9.2.Desarrollo del sistema óptico.	62
1.9.3.Modificación de holograma en línea de Gabor.....	64
1.9.4.Diseño del sistema óptico.....	64
2. La Interferometría Holográfica.....	65
2.1. Localización de las franjas.	67
2.2. Mediciones de desplazamientos mediante HI.....	68
2.3.1. Desplazamiento puro en z.....	70
2.3.2. Desplazamiento puro en x.	72
2.3.4. Desplazamiento combinado en tres dimensiones.	75
2.4. Principios generales de la holografía interferométrica digital.	76
2.4.1. Desenrollamiento, demodulación de la fase o fase demodulada	76
2.4.2.Reconstrucción del holograma interferométrico digital.	79
3.Análisis del holograma interferométrico.	81
3.1. Análisis cualitativo.	81
3.1.2. Simulación de las franjas.....	81
3.2. Análisis cuantitativo.	87

Capítulo III: Resultados de holografía interferométrica

convencional.....	89
1.Inducción de la deformación por métodos estáticos.....	89
1.1.Inducción de las deformaciones por dilatación.	89
1.1.1.Uso de la HI como técnica de análisis y medición.	90
1.1.2.Uso del estudio cualitativo de la HI para la localización de grietas y tensiones residuales.....	95
1.1.3. Uso de la HI en el estudio comparativo del corte con prensa de corte rápido y láser de CO ₂ , sobre acero Si usado en la fabricación de transformadores.....	100
1.1.4. Uso de la HI en el análisis cualitativo de una probeta metalográfica.	106
2.Inducción de la deformación por métodos dinámicos.	108
2.1.Inducción de las deformaciones por ondas de sonido.	108
2.1.1. Inducción de oscilaciones sobre una membrana elástica, análisis por HI y contraste por MEF .	109
2.1.2.Detección de grietas mediante inducción de ondas de sonido.....	112
3.Conclusiones.....	115

Capítulo IV: Resultados de holografía digital.....

1.Resultados de la aplicación diseño del esquema óptico alternativo.	117
---	-----

2.Soluciones aportadas para el mejoramiento del sistema óptico y el algoritmo de procesamiento.	117
2.1. Eliminación del término de continua.	117
2.2.Solución al bajo nivel de contraste.	119
2.3.Formación de imágenes múltiples.	120
2.4.Superposición de la imagen real y virtual	126
2.5.Alto nivel de ruido speckle.	126
3.Mejoramiento de la imagen de amplitud.	127
3.1.Implementación de filtros lineales por correlación y convolución.....	128
3.2.Implementación de filtros gaussianos.....	131
3.3 Implementación de filtros de remoción de ruido.	132
3.4.Mejora de la imagen de amplitud posterior a la reconstrucción.	133

Capítulo V: Resultados obtenidos con interferometría holográfica digital.....

1.Métodos de inducción de la deformación.....	135
1.1.Métodos estáticos.	135
1.2.Inducción de las deformaciones por métodos dinámicos.	139
2.Análisis de los HID.	140
2.1.Análisis cualitativo del holograma digital.	141
2.2.Análisis cuantitativo del holograma digital.	143
3.Aplicaciones de la HID en ensayos no destructivos.	144
3.1.Análisis cualitativo.	144
3.1.1.Dilatación aplicada a la detección de grietas en procesos de plaqueado por láser.	144
3.1.2.Detección por interferometría holográfica digital de fisuras en una tapa de cilindros	151
3.1.3.Aplicación de la interferometría holográfica como método de detección de defectos en las soldaduras usadas en estructuras de acero nervado.	157
3.2.Análisis cuantitativo.	161
3.2.2. Medición de desplazamiento puro en z.	164
4.Conclusiones.....	166

Capítulo VI: Determinación del sentido de la deformación por medio el análisis dinámico del holograma interferométrico

1.La información perdida.	170
2.La información desconocida en la HI.....	171
3.El modelo dinámico en la observación del holograma.	171
4.Demostración de la relación entre la rotación del ángulo de observación y la información perdida.	172

4.1.El interferómetro de Michelson como modelo dinámico.	172
4.2.Simulación dinámica con rotación del observador en un HI con deformación pura en z.	175
4.3.Simulación dinámica con rotación del observador en un HI con deformación bidimensional y bidireccional en z.	177
5.Aplicación de la HID para la determinación.	181
5.1.Rotación del plano del objeto.	181
5.2.Construcción de HID mediante la variación del plano del objeto.	183
6. Recuperación de la información perdida.	188
7. Combinación de las técnicas de holografía convencional y digital.	189
7.1. Análisis interferométrico de grandes objetos	189
7.3. Hologramas sobrepuestos.	190
7.4. Determinación de la magnitud de la deformación, método inverso.	190
 Capítulo VII: Conclusiones	193
1.Conclusiones.....	193
 Bibliografía.....	171
Anexo I. Publicaciones.....	175

Índice de figuras.

Capítulo I:

Figura 1- 1. Ejemplos de aplicaciones de la holografía en los años 70.....	28
--	----

Capítulo II:

Figura 2-1. Diagrama que define las coordenadas de los planos involucrados en la transmisión de la luz por una abertura.....	36
Figura 2- 2. Esquema óptico utilizado para grabar un holograma en línea de Gabor.	37
Figura 2- 3. Reconstrucción de la imagen en un holograma en línea de Gabor.....	38
Figura 2- 4. Esquema que representa la construcción de un holograma de L-U.....	39
Figura 2- 5. Reconstrucción de la imagen en un holograma de L-U.....	41
Figura 2- 6. Esquema que representa la formación de imágenes mediante la técnica de la holografía de Fourier sin lentes.....	42
Figura 2- 7. Sistema óptico usado para la construcción de un holograma de Fourier sin lente.....	43
Figura 2- 8. Sistema de coordenadas usado para referenciar la formación del holograma.....	44
Figura 2- 9. Sistema de coordenadas usado para referenciar la formación de la imagen.	45
Figura 2- 10. Patrón de speckle resultante de iluminar con láser de 632,8 nm	46
Figura 2- 11. Histograma de intensidades resultantes, sobre dos líneas horizontales del pimienta mostrado en la figura 2-10.....	47
Figura 2- 12. Esquema general para la construcción de un holograma transmisión de haz directo.	48
Figura 2- 13. Esquema general para la construcción de un holograma reflexión de haz directo.	48
Figura 2- 14. Esquema general para la reconstrucción de un holograma transmisión de haz directo.	48
Figura 2- 15. Esquema general para la reconstrucción de un holograma reflexión de haz directo.	48
Figura 2- 16. Esquema general para la construcción de un holograma transmisión de haz dividido.	49
Figura 2- 17. Esquema general para la construcción de un holograma reflexión de haz dividido.	49
Figura 2- 18. Mesa de bajo costo construida en metal.	50
Figura 2- 19. Mesa con elementos de soporte de componentes ópticos.....	50
Figura 2- 21. Fotografía de un espejo metálico de primera cara	52
Figura 2- 20. Divisor de haz donde se ve la imagen de la cámara (reflejada) y la de un soporte (transmitida).	52
Figura 2- 22. Detalles de los componentes que integran un filtro espacial, con tres grados de libertad.	53
Figura 2- 23. Curvas de caracterización de la película holográfica Slavich PFG-01 de 3000 líneas/mm	54
Figura 2- 24. Antiguo sistema de observación de hologramas.....	55
Figura 2- 25. Esquema óptico para la observación de hologramas, con variación del ángulo de observación.	56
Figura 2- 26. Fotografías de dos esquemas de planos paralelos usados en la construcción de hologramas	57
Figura 2- 27. Sistema de coordenadas para la reconstrucción numérica del holograma.	58
Figura 2- 28. Esquema general de un holograma sin lente de Fourier.	61
Figura 2- 29. Diagrama de flujo aplicado en el programa de obtención de un holograma de amplitud	63
Figura 2- 30. Esquema de holograma en línea de Gabor, de haz dividido.....	63
Figura 2- 31. Fotografía del montaje de un esquema de Gabor de haz sobrepuesto	64
Figura 2- 32. Secuencias de HI usados para la caracterización de un proceso de restauración de una estatua greco-romana	66
Figura 2- 33. Esquema que representa la diferencia de caminos ópticos, debido a un desplazamiento del objeto bajo estudio	68
Figura 2- 34. ITH 5-2007. Imagen holográfica de la probeta y del patrón de HI resultante, para un $\Delta T = 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	70
Figura 2- 35. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en la dirección pura en z.....	71
Figura 2- 36. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en la dirección pura en x.....	72
Figura 2- 37. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en la dirección pura en y.....	74

Figura 2- 38. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en tres dimensiones.....	75
Figura 2- 39. Patrón de interferencia resultante por flexión de una barra.	77
Figura 2- 40. Diagrama de fase lineal correspondiente a la distribución de franjas de la simulación de la figura 2-39.....	77
Figura 2- 41. Función de escalonamiento discreto de fase	78
Figura 2- 42. Imagen de holográfica de amplitud del corte transversal de una barra de acero nervado.....	78
Figura 2- 43. Imagen del HID de fase luego de la aplicación de un filtro seno –coseno	78
Figura 2- 44. Diagrama de flujo que representa el algoritmo de reconstrucción y análisis del HID.....	80
Figura 2- 45. Comparación de la imagen de fase con su correspondiente imagen.....	81
Figura 2- 46. Franjas resultantes de una simulación para una deformación en predominante en x.....	82
Figura 2- 47. Gráfico que muestra sentidos opuestos de deformación localizada sobre un objeto plano.....	83
Figura 2- 48. Gráfico que muestra la distribución de franjas resultantes, correspondiente con la deformación de la figura 49.	83
Figura 2- 49. Flexión introducida con centro en x, con dirección positiva en z.....	84
Figura 2- 50. Patrón de franjas resultante de una flexión introducida con centro en x, con dirección positiva en z.	84
Figura 2- 51. Representación de la rotación introducida en el objeto en dirección z y con centro en z	85
Figura 2- 52. Diagrama de franjas resultante correspondiente con una rotación en z con centro en un extremo.	85
Figura 2- 53. Simulación de la formación de franjas correspondiente a una deformación predominante en $[x,z]$	86
Figura 2- 54. Simulación de la formación de franjas donde se combinan deformaciones en x y localizadas en z.....	86
Figura 2- 55. Ensayo por HID para la determinación de grietas en una superficie.	87

Capítulo III:

Figura 3- 1. ITH 2-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	90
Figura 3- 2. ITH 3-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$	91
Figura 3- 3. Perfil de intensidades mediante el programa Píxel Profile del ITH 3-2007, zona central.	91
Figura 3- 4. ITH 4-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$	92
Figura 3- 5. ITH 5-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	92
Figura 3- 6. Fotografía utilizada para la definición y cuantificación de las trayectorias y ángulos.....	93
Figura 3- 7. Simulación obtenida mediante la introducción de una flexión de la barra combinada con una dilatación.	95
Figura 3- 8. Esquema modificado para la introducción de una lente convergente y fotografía del holograma resultante.	96
Figura 3- 9. HI resultante de la dilatación de una probeta con un $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$, vista a través de una lupa.	97
Figura 3- 10. Fotografía que muestra el estado de la probeta n° 2.	97
Figura 3- 11. Imagen resultante del ITH-12, probeta n° 2, con un intervalo de temperatura $\Delta t\text{ }5\text{ }^{\circ}\text{C}$	98
Figura 3- 12. Interferograma ITH –13, probeta n° 2, con un intervalo de temperatura $\Delta t\text{ }5\text{ }^{\circ}\text{C}$	98
Figura 3- 13. Interferograma ITH-14, con un intervalo de temperatura $\Delta t\text{ }-3\text{ }^{\circ}\text{C}$	99
Figura 3- 14. Holograma del núcleo E correspondiente a la muestra 1 con un Δt de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$	100
Figura 3- 15. Holograma del núcleo E muestra 2, para un Δt de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$	101
Figura 3- 16. Detalle comparativo del corte resultante con prensa de corte rápido y con láser de CO_2 con potencias de 400 W	102
Figura 3- 17. Gráficos comparativos de microdureza de la zona cercana al corte con láser.	102
Figura 3- 18. Holograma del núcleo E muestra 2-B, para un Δt de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$	103
Figura 3- 20. Muestra 7-C, holograma obtenido para un Δt de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$	104
Figura 3- 21. Fotografía de hologramas correspondientes a dos muestras diferentes cortadas con prensa.....	105
Figura 3- 22. Hologramas de tres muestras diferentes cortadas por ambos métodos	106
Figura 3- 23. Hologramas de dos muestras diferentes cortadas por láser	106
Figura 3- 24. Ensayo sobre probeta metalográfica con un Δt de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	107
Figura 3- 25. Imagen ampliada de la probeta para $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ de Δt y grafica del perfil de intensidad resultante sobre el holograma.	107
Figura 3- 26. Despiece del sistema utilizado para el montaje de la membrana.....	108

Figura 3- 27. Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 3 mA.....	109
Figura 3- 28. Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 8 mA.....	110
Figura 3- 29. Elemento Isoparamétrico.	110
Figura 3- 30. Simulaciones resultantes de los modos naturales de vibración de la membrana elástica	111
Figura 3- 31. Simulación resultantes de los modos naturales de vibración de la membrana elástica.....	111
Figura 3- 32. Holograma de referencia de la membrana.....	112
Figura 3- 33. Holograma de la membrana luego de haberle efectuado un corte vertical deformación pura en z.....	113
Figura 3- 34. Óleo de Vercelli de la serie Pesche in Fiore.	113
Figura 3- 35. Zona de estudio, óleo de Vercelli de la serie Pesche in Fiore.	114
Figura 3- 36. Imágenes comparativas de la misma zona de la pintura.....	114
Figura 3- 37. HI de la zona bajo estudio en el cuadro de Verchelli, cuando se usa excitación acústica localizada.	115

Capítulo IV:

Figura 4- 1. Detalle de la imagen central de difracción.	118
Figura 4- 2. Reproducción de la misma imagen (a) sin el algoritmo de eliminación del dc, (b) con algoritmo de supresión.....	118
Figura 4- 3. Objeto utilizado: tornillo metálico roscado sobre columna de soporte.....	119
Figura 4- 4. Reproducción de la imagen con diferentes vlores del coeficiente γ	120
Figura 4- 5. Ejemplo de toma de imágenes y mediciones para su correspondiente medición de coordenadas.	121
Figura 4- 6. Posición inicial, posición final del objeto	122
Figura 4- 7. Posición inicial, Posición final del objeto	123
Figura 4- 8. Relaciones funcionales entre la posición de la imagen y del objeto.....	124
Figura 4- 9. Secuencia de hologramas reconstruidos con diferentes valores del término exponencial.....	125
Figura 4- 10. Perfil de intensidades correspondientes a la imagen $K=0.4$	125
Figura 4- 11. Superposición de la imagen real y virtual en un holograma en línea de Gabor.....	126
Figura 4- 12. Ejemplo de matrices de los coeficientes.....	128
Figura 4- 13. Imágenes resultantes de la aplicación de filtros de correlación	129
Figura 4- 14. Imágenes resultantes de la aplicación de filtros de correlación	129
Figura 4- 15. Imágenes resultantes de la aplicación de filtros de correlación.....	130
Figura 4- 16. Imágenes resultantes de la aplicación de filtros de correlación.....	130
Figura 4- 17. Imágenes resultantes de la aplicación de filtrado y sustracción..	130
Figura 4- 18. Imágenes resultantes de la aplicación de un filtro gaussiano	131
Figura 4- 19. Imágenes resultantes de la aplicación de un filtro gaussiano	132
Figura 4- 20. Imágenes resultantes de la aplicación de un filtro de reducción de ruido.....	132
Figura 4- 21. Imágenes resultantes de la aplicación de un filtro de reducción de ruido.....	133
Figura 4- 22. Imágenes resultantes de la aplicación de filtros y separación de la zona de interés.	133

Capítulo V:

Figura 5- 1. Imágenes correspndientes al HID de una barra bimetalítica.....	136
Figura 5- 2. Imágenes correspndientes al HID de un taco de goma.....	137
Figura 5- 3. Esquema óptico utilizado y sistema de tracción.....	138
Figura 5- 4. Resultados de un HID por desplazamiento.	138
Figura 5- 5. Fotografía, vista superior, del montaje para lograr la oscilación del material bimetalítico.	139
Figura 5- 6. Imagen de fase del material bimetalítico sometido a vibraciones mediante ondas de sonido.....	139
Figura 5- 7. Secuencia de tres hologramas de fase de la oscilación de una banda de látex.....	140
Figura 5- 8. Magnificación X30 de un defecto de soldadura en la zona de aporte de material y su HID..	141

Figura 5- 9. Holograma de amplitud en el cual se observa el corte realizado sobre una banda de goma.y sus HID.....	142
Figura 5- 10. Secuencia de tres HID correspondiente con la parte superior izquierda de una E de transformador.....	142
Figura 5- 11. Medición mediante software de procesamiento de imágenes de los ángulos definidos en el sistema óptico	144
Figura 5- 12. HID de un corte transversal de una probeta resultante de un proceso de plaqueado	145
Figura 5- 13. Secuencia de HID y diagrama de demodulación de fase e una probeta resultante de un proceso de plaqueado	145
Figura 5- 14. Tres de los diagramas de fase demodulada tomados en la zona central de la probeta.....	146
Figura 5- 15. Imagen que muestra la zona depositada en cordones sucesivos sobre la probeta N° 3.....	147
Figura 5- 16. Fotografías obtenidas con el uso de lupa estereoscópica con aumentos de X10 y X22 de una muestra.....	147
Figura 5- 17. Holograma de amplitud con la totalidad de los gemelos de una muestra	148
Figura 5- 18. Ampliación posterior al filtrado de la imagen de fase de la zona donde se encuentra una grieta superior.	148
Figura 5- 19. Diagrama de fase demodulada donde se indican grietas	149
Figura 5- 20. Estudio mediante HID de la presencia de grietas en una probeta de plaqueado.....	149
Figura 5- 21. Detección de grieta en una probeta de plaqueado.	150
Figura 5- 22. Diagrama de fase demodulada correspondiente a la zona superior de la zona depositada.	150
Figura 5- 23. Diagramas de fase demodulada para diferentes intervalos de temperatura	151
Figura 5- 24. Sección de la tapa de cilindros usado para el análisis	152
Figura 5- 25. HID correspondiente a la secuencia (tapa de cilindros)	153
Figura 5- 26. Diagramas de demodulación de fase obtenidos por el método BranchCut y el método de Guiado de calidad.....	153
Figura 5- 27. Holograma de amplitud para la dirección de la fisura.....	154
Figura 5- 28. Diagrama de fase de la HID obtenidos mediante dos métodos.	154
Figura 5- 29. Diagrama de fase de la HID obtenidos mediante dos métodos	155
Figura 5- 30. Diagrama de interferencia resultante de los hologramas 50-100.....	155
Figura 5- 31. Imagen de amplitud, imagen de fase y hologramas de amplitud y fase combinadas.....	156
Figura 5- 32. Diagrama de fase luego de aplicar filtro seno-coseno.	156
Figura 5- 33. Diagramas de fase demodulada correspondientes a la zona de interés.....	156
Figura 5- 34. Muestra de barra principal de acero nervado obtenida de la estructura colapsada.	157
Figura 5- 35. Esquema aplicado en el estudio de las muestras de acero nervado provenientes de una estructura colapsada.....	157
Figura 5- 36. Hologramas de las muestras número 1 y 2 su HID	158
Figura 5- 37. Detalle del defecto localizado en el interior de la zona de soldadura.....	158
Figura 5- 38. Secuencia de tres HID con diferentes intervalos de temperatura.	159
Figura 5- 39. Diagrama de fase del HID.....	159
Figura 5- 40. Imagen de amplitud de la muestra 4 y resultado de su HID.	160
Figura 5- 41. Fotografía del sistema de suspensión y detalle del taco de goma.....	161
Figura 5- 42. Esquema de montaje del sistema de deformación utilizado sobre el taco de goma.....	162
Figura 5- 43. HID resultantes de aplicar incrementos de 10 g sobre el punto de apoyo del inductor de la deformación.....	162
Figura 5- 44. Graficas de deformación en función de fuerza y gráfica de incremento de deformación.....	164
Figura 5- 45. Esquema en el que se muestra el punto de presión P y los estados inicial y final de la parte E del núcleo ensayado.	165
Figura 5- 46. Holograma de amplitud de la zona de estudio y holograma de fase.....	165
Figura 5- 47. Diagrama de fase demodulada.	166

Capítulo VI:

Figura 6- 1.HID resultante de aplicar una variación térmica a una membrana bimetálica.....	170
Figura 6- 2. Reconstrucción mediante el uso de una plancheta digitalizadora del patrón de franjas resultantes de un HL.....	170
Figura 6- 3. Secuencia de fotogramas que muestran el cambio de ordenamiento de franjas en rotación de la observación.	171
Figura 6- 4. Fotogramas sucesivos correspondientes a un interferómetro de Michelson.....	173
Figura 6- 5. Cuadros sucesivos de simulación correspondientes a un interferómetro de Michelson.	173

Figura 6- 6. Diagrama de trayectorias y franjas resultantes por simulación.Rotación horaria.	174
Figura 6- 7. Diagrama de superficie en el cual se muestra la inducción de una deformación.....	176
Figura 6- 8. Diagramas fase y de superficie en los cuales se muestran la inducción de una deformación.....	176
Figura 6- 9. Diagrama de superficie que representa la variación de fase total observada sobre el objeto.....	177
Figura 6- 10. Secuencia de diagramas obtenidos de la simulación para una deformación pura en x.	178
Figura 6- 11. Secuencia de diagramas de franjas obtenidos de la simulación para una rotación del ángulo de observación.....	179
Figura 6- 12. Secuencia de fotogramas y gráficos que muestran la el resultado de la rotación del ángulo del objeto.	182
Figura 6- 13. Esquema usado para introducir la rotación del ángulo del objeto.	184
Figura 6- 14. Secuencia de tres HID correspondientes a posiciones angulares de 0°, 1,4° y 2,7°.	184
Figura 6- 15. Diagrama de fase demodulada de la superficie del bimetalico.....	185
Figura 6- 16. Ejemplo de medición de ángulos de observación e iluminación	186
Figura 6- 17. Secuencia de 4 HID diferentes intervalos de excitación de la bobina de un parlante.....	186
Figura 6- 18. Diagrama de demodulación de fase correspondiente al primero y segundo HID de la figura 6-17.....	187
Figura 6- 19. HID que representa deformaciones fuera y dentro del plano	188
Figura 6- 20. Representación de la combinación de HI y HID.	189
Figura 6- 21. Esquema sugerido para la implementación de HID y HID.	190

Capítulo I: Introducción y objetivos

1. Introducción.

1.1. Holografía.

La holografía inventada conceptualmente por el ingeniero húngaro Denis Gabor, fue desarrollada sin el auxilio de complejos cálculos matemáticos. En su lectura, cuando le fuera otorgado el premio Nobel de Física en el año 1971, hace referencia particularmente a este hecho.

HOLOGRAPHY, 1948-1971

Nobel Lecture, December 11, 1971

by

DENNIS GABOR

Imperial Colleges of Science and Technology, London

I have the advantage in this lecture, over many of my predecessors that I need not write down a single equation or show an abstract graph. One can of course introduce almost any amount of mathematics into holography, but the essentials can be explained and understood from physical arguments...

La genialidad de Gabor estuvo en su capacidad de entender que para la formación de imágenes tridimensionales era necesario contar con la posibilidad de obtener y almacenar toda la información volumétrica proveniente del objeto.

La luz como onda, presenta tres elementos fundamentales, la amplitud, la frecuencia y la fase. En esta última subyace la posibilidad de registrar la morfología de un objeto. Así, Gabor reconoció rápidamente que la clave se encontraba en la interferencia de dos frentes de onda, cuya particularidad era un alto grado de coherencia espacio temporal.

Todo el esfuerzo mental para la creación de esta forma de registro se vio coronado 15 años después con el desarrollo de la primera fuente de luz de muy alta coherencia. El láser implementado a principios de los 60, dio lugar una avalancha de investigadores ansiosos por demostrar y aplicar los conceptos de Gabor.

Múltiples y diferentes métodos fueron desarrollados en los años que siguieron al desarrollo del láser, tal vez los más relevantes sean los desarrollados por Cross en 1977 (hologramas multiplexados) o por Denisjuk (hologramas de volumen) en la Unión Soviética.

1.2. Interferometría holográfica

Sin dudas que la holografía presentaba un desafío científico para su desarrollo, abriendo además un notable abanico de posibilidades de aplicación. Las primeras aplicaciones de la holografía fueron para el registro y visualización de imágenes tridimensionales. Es así que en Venecia, en el año 1972 ante la presunción de una inundación catastrófica, todas las esculturas de la ciudad fueron holografiadas en tamaño natural como forma de conservar un registro que permitiera su exacta reproducción [Asmus, 2003]. Como consecuencia, esta capacidad del registro holográfico fue la que propició las aplicaciones a ensayos no destructivos en distintos campos de la ciencia y la ingeniería. Powell y Stetson en el año 1965 [Powell, 1965] publican los primeros desarrollos en el campo de la interferometría holográfica, paralelamente a otros grupos de investigación.

Múltiples aplicaciones fueron desarrolladas hasta nuestros días, tal vez una de las más clásicas es la determinación de los modos resonantes de los álabes de una turbina [Caufield, 1979], [Hariharan, 1996] presente en gran parte de la bibliografía. El espectro de aplicaciones y los trabajos realizados no parecen tener un límite dentro de los ensayos no destructivos. Una sucesión de aplicaciones de la holografía interferométrica (HI) son documentadas en el Capítulo III como parte de las tareas desarrolladas en los años precedentes a la redacción de esta tesis. Estas aplicaciones se basan en la interferometría holográfica (HI) de doble exposición, que consiste en la suma o superposición de dos frentes de onda dispersados por el objeto en dos estados diferentes, un estado inicial y otro deformado.

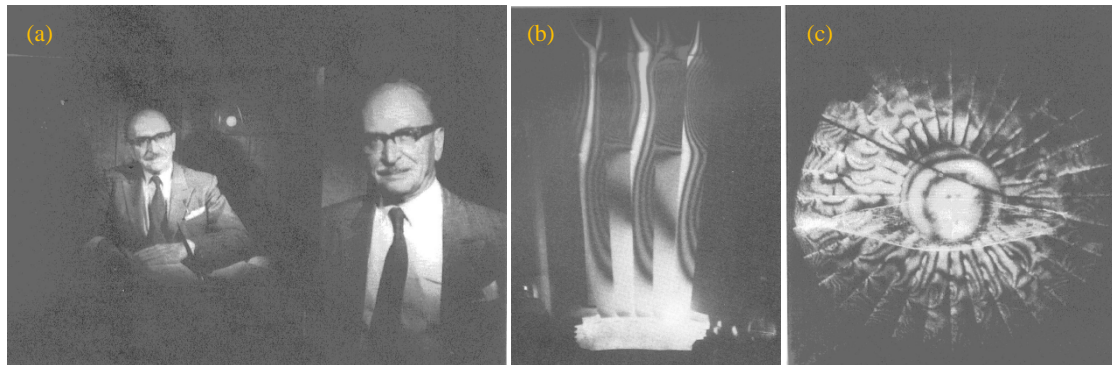


Figura 1- 1. Ejemplos de aplicaciones de la holografía en los años 70. (a) Fotografía del Prof. Denis Gabor posando junto a su holograma realizado por R. Rinehart. (b) Ensayo por HI de los álabes de una turbina [Caufield, 1979]. (c) Ensayo por HI de los álabes de una turbina [Hariharan, 1996].

Si se realiza un estudio de los ensayos no destructivos publicados en los 70 y 80, vemos que en su mayoría contemplan aspectos fundamentalmente cualitativos [Biedermann, 1970], [Abramson, 1973], [Chatelain, 1973]. El hecho de encontrar una cantidad limitada de aplicaciones cuantitativas se relaciona con la dificultad de lograr la medición de las deformaciones. En gran medida, debido a las dificultades que se observaban para extraer la información almacenada en el holograma. Como alternativa, la holografía interferométrica de tiempo real solucionaba algunas de las complicaciones antes detalladas, sin embargo el gran reto consistía en el esquema óptico necesario para su implementación.

1.3. Registro holográfico.

En holografía convencional, los patrones de interferencia se registran en películas fotosensibles con resolución espacial del orden de entre 3.000 y 10.000 líneas por milímetro. Esta forma de hacer interferometría holográfica impuso la necesidad del desarrollo de materiales fotosensibles de mayor resolución. Como todo proceso fotográfico existe la necesidad de realizar un procesamiento químico de la película o placa, para lograr la reconstrucción de la imagen. El revelado, con un alto conocimiento empírico, desalentó la aplicación de este método a un campo de aplicación más amplio. Por otra parte, tanto las técnicas de doble exposición como las de tiempo real tenían como principal dificultad los tiempos necesarios para la calibración de la deformación inducida. En algunos casos eran necesarias largas jornadas de trabajo para la obtención de uno o dos hologramas. El conjunto de dificultades junto a los inconvenientes para lograr mediciones directas de las deformaciones, finalmente hicieron poco atractiva a la HI como ensayo no destructivo.

A partir de los años 80 los ensayos por interferometría holográfica cedieron lugar a la interferometría speckle, método por el cual era posible obtener una información similar, de menor precisión, pero a partir de ordenadores con resultados cuantitativos obtenidos en forma directa a partir de un algoritmo.

Actualmente, gracias al avance tecnológico la posibilidad de registrar patrones de interferencia con cámaras digitales y la recuperación de la información por medio de métodos numéricos abrió una nueva puerta al campo de la interferometría. La holografía digital (HD), llamado así al proceso del registro digital y reconstrucción de hologramas por métodos numéricos, evita el proceso químico de revelado para analizar los hologramas o el patrón de interferencia. Este enfoque dispuso el camino para el desarrollo de la holografía interferométrica digital (HID). Sin embargo, no es posible equiparar a ambos métodos en estado actual de la tecnología. Las cámaras de CCD o CMOS presentan como límite fundamental una baja resolución. Mientras la película o placa holográfica tiene la capacidad de definir hasta 10.000 puntos por milímetro una cámara de CCD o CMOS solo pueden alcanzar un máximo de 600 líneas por milímetro, valor equivalente al de una película fotográfica convencional.

Como consecuencia los esquemas ópticos y en particular el tamaño de los objetos se encuentra fuertemente acotado. Es imposible pensar al día de hoy la obtención de un HID como los de la figura 1-1, en el cual pueda ser evaluada una turbina. Por otra parte, si bien los ensayos se encuentran limitados, en los últimos años se han desarrollado técnicas de escaneo holográfico que permiten la reconstrucción numérica de imágenes de objetos de grandes dimensiones [Osten, 2012]. De esta forma la posibilidad de combinación de ambas técnicas holográficas es una posibilidad cierta de aplicación.

1.4. Aplicaciones a ensayos no destructivos.

Actualmente la interferometría holográfica ha encontrado nuevos campos de aplicación en los cuales resulta ser una herramienta indispensable por el nivel de precisión que puede ser obtenido en las mediciones con el auxilio de sistemas informáticos y cámaras de CCD, así como también por la información cualitativa que resulta ser de fundamental importancia en campos de aplicación tales como el diagnóstico del estado de conservación del patrimonio histórico y cultural.

Numerosos trabajos ponen de manifiesto las capacidades de la HI como método de ensayo no destructivo, basándonos en un análisis cualitativo [Ludman, 2002]. Sin embargo desde un punto de vista cuantitativo muchos aspectos quedan indefinidos. En particular, los ensayos con variación térmica del objeto o experiencias desarrolladas por medio de excitación sonora, que son en general de fácil implementación, resultan sumamente difíciles en cuanto a la cuantificación de los resultados obtenidos. Además, parte de la información debe ser sacrificada cuando el método de inducción de la deformación permite un cambio indefinido en la dirección de la deformación. Por otra parte la holografía digital aporta una serie de herramientas que pueden resolver algunos de los problemas documentados en la holografía convencional [Caufield, 1979]; en concreto la posibilidad de obtener resultados cuantitativos.

2. Objetivos.

Desde la invención de la holografía hasta la actualidad se han desarrollado múltiples experiencias, sistemas ópticos y métodos de registro. Cada uno de estos orientado a mejorar las capacidades de la interferometría holográfica como método de ensayo no destructivo. Sin embargo, ciertos aspectos han quedado irresueltos hasta el presente. Entre estos la imposibilidad de obtener toda la información asociada a una deformación volumétrica libre. Resulta muy simple definir la expansión o contracción de una esfera de material homogéneo, se conoce de antemano cuál de las dos operaciones es involucrada en la experiencia. Sin embargo, poco se puede saber de la dilatación térmica de un material de composición no homogéneo [Caufield, 1979]. Existen diferentes métodos aportados por diferentes investigadores para la obtención de esta información Pryputniewicz y Stetson [Pryputniewicz, 1976], entre otros, proponen obtener un conjunto ecuaciones de cuantificación a partir de al menos tres diferentes hologramas.

Caufield en su Handbook of Optical Holography define a esta como la información pérdida en el holograma interferométrico.

De la implementación de la HI y de la HID es posible obtener información complementaria y suplementaria. Esto hace suponer la posibilidad de combinar ambas técnicas para maximizar la información obtenida de un ensayo no destructivo.

El objetivo de este trabajo, es estudiar la posibilidad de relacionar ambas técnicas holográficas (convencional y digital) junto con aspectos dinámicos en la observación o construcción del holograma, con el fin de obtener el total de la información cuantitativa en un ensayo no destructivo.

Para conseguir este objetivo se plantean una serie de hitos:

- Definir los límites en las aplicaciones de la holografía convencional, relacionados con la obtención de información cuantitativa.
- Encontrar modelos matemáticos que describan los procesos de deformación tridimensionales y que puedan ser usados en simulaciones computacionales.
- Proponer variaciones en los esquemas ópticos de holografía convencional con el fin de maximizar la información cuantitativa aportada por las franjas de interferencia.
- Introducir cambios en los sistemas de observación de los HI, introduciendo modelos dinámicos.
- Implementar esquemas ópticos de holografía digital, compatibles con los cambios introducidos en HI.
- Desarrollar rutinas de reconstrucción de las imágenes holográficas digitales, explorando los límites y definiendo soluciones.
- Implementar rutinas para la separación del holograma de amplitud y del holograma de fase, desarrollar filtros y algoritmos de demodulación de fase.
- Desarrollar modelos de simulación computacional que permitan estudiar el comportamiento dinámico de la observación del HI y/o construcción dinámica del HID.
- Estudiar las formas de combinar los HI y los HID sobre un mismo objeto.
- Como objetivo final, demostrar la capacidad de la combinación de los métodos HI, HI dinámica y HID para la recuperación de la información perdida.

2.1. Cómo se organiza este trabajo.

El presente trabajo comienza con una pormenorizada explicación de la teoría que explica la formación o construcción del holograma y los detalles que comprenden la denominada reconstrucción. Diferentes modelos matemáticos son usados para explicar la holografía, los que serán utilizados para el desarrollo de modelos simplificados. Estos, serán orientados a lograr simulaciones computacionales que permitan reproducir la formación de franjas de interferencia derivadas de procesos de HI/D.

En el Capítulo II se describen además los detalles relacionados con la implementación de la HI y de la HID, describiendo las diferentes técnicas de construcción y reconstrucción.

En el tercer capítulo, se muestran toda una serie de ensayos por HI que demuestran las posibilidades de aplicación. Además se buscan los límites respecto de la información cuantitativa que puede ser obtenida a partir de la HI. Como parte integral se introducen comparaciones entre la HI y el método de simulación por elementos finitos, aplicados al caso particular de una membrana vibrante de material no homogéneo.

Como derivación de los procesos de observación de diferentes HI, en los cuales se introduce una cámara de CCD (holografía digital primaria) para el registro de la imagen holográfica, se define el proceso dinámico de observación. Este, presenta como innovación la posibilidad de realizar la rotación del ángulo de observación mientras se captura la filmación de la imagen reconstruida.

En este mismo capítulo se muestra la aplicación de un brazo robotizado que permite la captura automática de imágenes en ángulos de observación predefinidos, reproduciendo en forma actualizada la técnica de Stetson desarrollada en los 80.

El conjunto de información aquí obtenida, representa los cimientos sobre los cuales se da origen al cumplimiento del objetivo fundamental de este trabajo.

En el cuarto capítulo se describe el proceso de selección del esquema óptico así como también del modelo de reconstrucción que será aplicado en el algoritmo destinado a la obtención de imágenes. Una vez seleccionado el esquema óptico, de características innovadoras en algunos aspectos, se detallan cada uno de los inconvenientes que derivan de su aplicación. La búsqueda de soluciones y modelos que permitan predecir la formación de las imágenes son analizados en profundidad. El estudio y aplicación del tratamiento digital de imágenes, empleado particularmente en los hologramas de amplitud, son documentados buscando de esta manera demostrar el mejor camino para la ecualización de la imagen holográfica.

En el Capítulo V se muestran los resultados derivados del proceso de selección del método de inducción de la deformación. Aquí, diferentes objetos son sometidos a diferentes tipos de excitación. Procesos de dilatación térmica, vibraciones mecánicas, compresiones, tracciones, desplazamientos y resonancia inducida por ondas de sonido son aplicados para definir el tipo de respuesta así como los límites de cada tipo de inducción. En una segunda parte se plantean los diferentes tipos de ensayos que pueden ser aplicados mediante HID de doble exposición. De esto surge una clasificación de ensayos cualitativos y cuantitativos, mostrándose el caso particular de la deformación unidimensional con sentido perpendicular al plano.

El núcleo central de este trabajo se encuentra en la demostración de la hipótesis planteada: la recuperación de la información perdida en interferometría holográfica. En el sexto capítulo se documentan cada una de las acciones desarrolladas para este fin. Inicialmente, a partir de una síntesis del problema a resolver, se definen los conceptos de información perdida. Posteriormente, se plantea una redefinición de este concepto a información desconocida.

El modelado matemático del proceso dinámico de observación de un HI es el punto de partida para el desarrollo de algoritmos que mediante simulaciones permitan reproducir diferentes tipos de familias de franjas asociadas a la información desconocida. El resultado final, un conjunto de reglas que permiten definir la forma de reconocer la información perdida mediante la observación dinámica del HI o la construcción dinámica del HID.

Finalmente, se muestra como la construcción de un HID dinámico permite la recuperación de la información desconocida, permitiendo concluir acerca de la potencialidad de la combinación de la HI y la HID.

En el último capítulo se detallan las conclusiones y el epílogo de este trabajo.

Capítulo II: Metodología

1. Holografía.

Tal como fue expresado anteriormente, Gabor desarrolló sus conceptos con un mínimo de ecuaciones matemáticas. Sin embargo, no es posible prescindir de igual manera de estas si lo que se busca es llegar a implementar holografía digital. En este capítulo se realiza una síntesis de los conceptos matemáticos fundamentales para la descripción de la holografía. Inicialmente, se detallan modelos matemáticos que describen tanto la construcción como la reconstrucción del holograma. Sentadas las bases de los conceptos elementales, posteriormente, se los relaciona con los modelos matemáticos para la implementación de la holografía digital.

Definidos los métodos para la obtención de hologramas, nos introduciremos en una síntesis de la holografía interferométrica, tanto convencional como digital. Sobre los conceptos de holografía interferométrica convencional (HI) se elabora una serie de modelos matemáticos que buscan relacionar las deformaciones sufridas por los cuerpos bajo estudio, con las diferencias de fase entre frentes de onda y las consideraciones geométricas del esquema óptico. Esto último, con el fin de llegar a ecuaciones matemáticas que permitan la cuantificación de la información obtenida de un HI.

Finalmente, se detallan las características de la holografía interferométrica digital (HID), explicando el concepto de demodulación de fase y la información derivada de estos.

1.1. Conceptos generales de la holografía.

En el proceso de construcción de un holograma debemos distinguir dos etapas bien diferenciadas: el registro y la reconstrucción. Durante la etapa de registro es necesario hacer coincidir sobre la película o cámara de CCD (holografía convencional o digital), dos frentes de onda. Estos provenientes de una misma fuente de luz de alta coherencia espacio - temporal. Se los distingue como haz del objeto y haz de referencia. El haz del objeto es aquel que se genera luego de la incidencia de la luz del láser sobre la superficie del objeto y su posterior dispersión. El haz de referencia mantiene las condiciones de emisión (fase relativa) de la fuente de luz.

Ambos frentes de onda deberán interferir sobre el medio de registro. Al producirse la interferencia, existirá sobre la película holográfica una distribución particular de intensidad luminosa, la cual responde a las diferencia de fase puntuales que se registren entre la luz dispersada por cada punto del objeto y la luz proveniente del láser. Así, cada grano fotosensible de la emulsión fotográfica o píxel de la cámara de CCD, reaccionará respondiendo a la ley general de la interferencia. Evidentemente, con un objeto morfológicamente complejo el patrón de interferencia será igualmente complejo. Es por esto que para dar una explicación concisa sobre la construcción de un holograma se recurre a modelos acotados tales como dos fuentes puntuales o dos frentes de ondas planos.

Luego del procesamiento de la película holográfica, en función del patrón de interferencia registrado, en esta quedará definida una red de difracción extremadamente compleja que al ser atravesada por el haz de referencia original, generará la imagen tridimensional del objeto holografiado.

Para comprender más acerca de la construcción del holograma podemos partir del concepto general de interferencia, el cual define la amplitud resultante en función de la diferencia de fase. Además, debemos mencionar que todo medio de registro no responde a la amplitud del vector de campo eléctrico o magnético, lo hace al valor de la intensidad resultante de la onda electromagnética.

Cualquier ecuación que defina el proceso de construcción de un holograma, así como también de las franjas de HI, dependerá de los valores de intensidad resultante. Por otra parte, la formación de las imágenes holográficas no se produce en forma instantánea. En todo proceso de registro del elemento fotosensible (película o cámara) existen tiempos finitos de grabación que pueden llegar a ser tan extensos como 8 segundos. Por lo cual, la formación de la imagen en todos los casos dependerá del valor medio de intensidad en cada punto. A consecuencia de esto es indispensable contar con un sistema óptico estático.

La ecuación general de interferencia de dos frentes planos es el punto de partida del modelo matemático que define la construcción del holograma.

La amplitud compleja debida al haz de referencia en cada punto del medio de registro puede ser escrita como:

$$A_r(x, y) = A_{mr}(x, y) \cdot e^{i\varphi_r(x, y)} \quad \text{Ec. 2-1}$$

Donde $A_{mr}(x, y) = |A_r(x, y)|$

Por otra parte el haz del objeto tendrá la forma:

$$A_o(x, y) = A_{mo}(x, y) \cdot e^{i\varphi_o(x, y)} \quad \text{Ec. 2-2}$$

Donde $A_{mo}(x, y) = |A_o(x, y)|$

La amplitud resultante de la interferencia de ambos frentes de onda será la suma de las ecuaciones.

$$A_o(x, y) + A_r(x, y) = A_{mr}(x, y) \cdot e^{i\varphi_r(x, y)} + A_{mo}(x, y) \cdot e^{i\varphi_o(x, y)} \quad \text{Ec. 2-3}$$

Así, la intensidad resultante sobre el medio de registro quedará definida por:

$$I(x, y) = \langle |A_o(x, y) + A_r(x, y)|^2 \rangle = \langle (A_o(x, y) + A_r(x, y)) \cdot (A_o(x, y) + A_r(x, y))^* \rangle$$

Donde el símbolo * referencia al término complejo conjugado e $\langle I(x, y) \rangle$ denota el promedio temporal correspondiente al tiempo de registro.

$$I(x, y) = A_{mo}(x, y)^2 + A_{mr}(x, y)^2 + 2 \cdot A_{mo}(x, y) \cdot A_{mr}(x, y) \cdot \cos(\varphi_r - \varphi_o)$$

$$I(x, y) = I_o(x, y) + I_r(x, y) + 2 \cdot \sqrt{I_o(x, y) \cdot I_r(x, y)} \cdot \cos(\varphi_r - \varphi_o) \quad \text{Ec. 2-4}$$

La ecuación 4 da la expresión de la interferencia resultante entre dos ondas planas, de manera que la intensidad registrada dependerá en cada punto de la modulación que introduce el coseno al doble del producto de las amplitudes individuales. Así nos encontraríamos que para una determinada coordenada en la cual la diferencia de fases fuera nula la intensidad resultante sería máxima y por el contrario en todas aquellas coordenadas donde la diferencia de fase sea un múltiplo impar de π la intensidad será mínima.

Para cualquier valor diferente de los antes mencionados, en la diferencias de fase, la intensidad registrará valores intermedios, que se relacionan con las propiedades morfológicas del objeto.

Una relación que posteriormente será de fundamental importancia para el entendimiento de la interferometría holográfica es la definida entre la diferencia de fase y la diferencia de camino óptico. Esta puede ser encontrada en la bibliografía de física general [Resnick, 1999] y que a continuación queda representada.

$$\frac{\text{dif. de camino óptico}}{\lambda} = \frac{\text{dif. de fase}}{2\pi}$$

Relación que representa la diferencia de fase en función de las diferencias de caminos ópticos seguidos por la luz desde cada uno de los puntos de la superficie del objeto.

1.2. Coherencia.

La propiedad fundamental que hace posible la holografía es la denominada coherencia de la luz. No es un aspecto menor a tener en cuenta, el propio Gabor sufría la falta de una fuente coherente de luz que le permitiera demostrar sus conceptos. Así como fue complejo obtener un láser, sigue siendo compleja su definición, que a lo largo del tiempo ha sido enunciada en diferentes formas.

La más conocida es tal vez:

Coherencia es la capacidad que tienen dos ondas de interferir.

O bien:

Dos ondas son coherentes si son capaces de generar patrones de interferencia.

Hoy la definición se sustenta sobre conceptos más concretos como las propiedades de correlación entre dos campos ópticos o bien como el fenómeno que revela la correlación entre dos ondas de luz [Lauterborn, 1995].

En holografía, la coherencia necesaria, se estima de manera que la diferencia de caminos geométricos para cada una de las trayectorias (haz del objeto y haz de referencia) no sea mayor a la distancia equivalente a la mitad de la longitud de la cavidad resonante del láser.

Evidentemente que para poder lograr una buena definición del patrón de interferencia que da origen al holograma, la fuente de luz deberá ser la de mayor coherencia espacio-temporal posible, el láser de He-Ne es por excelencia la fuente de luz utilizada.

1.3. Difracción de la luz, el origen de la imagen holográfica.

En los párrafos precedentes se demostró que la construcción de un holograma se origina en la interferencia y que la reconstrucción en la difracción.

Para definir en forma acotada la interferencia que da origen a la imagen holográfica, fue posible encontrar un modelo simplificado. El mismo criterio puede ser utilizado para definir la formación de la imagen debida a la difracción en la película luego de ser procesada químicamente. Para esto, puede ser usado como modelo la interacción entre un frente de luz coherente y una abertura de pequeñas dimensiones, modelo equivalente a la difracción generada en el grano de emulsión fotográfica.

Si escogemos una fuente de luz puntual, ubicada en el denominado plano de la fuente $P_0 (x_0, y_0)$ la cual ilumina una apertura ubicada en un segundo plano (ξ, η) y que luego de atravesar la apertura incide sobre el plano final (x, y) , entonces podemos ser capaces de predecir los que sucede con la amplitud compleja en el punto P del tercer plano. Si idealmente los ángulos son pequeños entonces la integral de difracción queda definida por:

$$A(P) = \frac{-i\alpha}{2\lambda} \iint \frac{e^{ik(r+s)}}{rs} dQ \quad \text{Ec. 2-6}$$

Donde la nomenclatura utilizada guarda referencia con la figura 2-1.

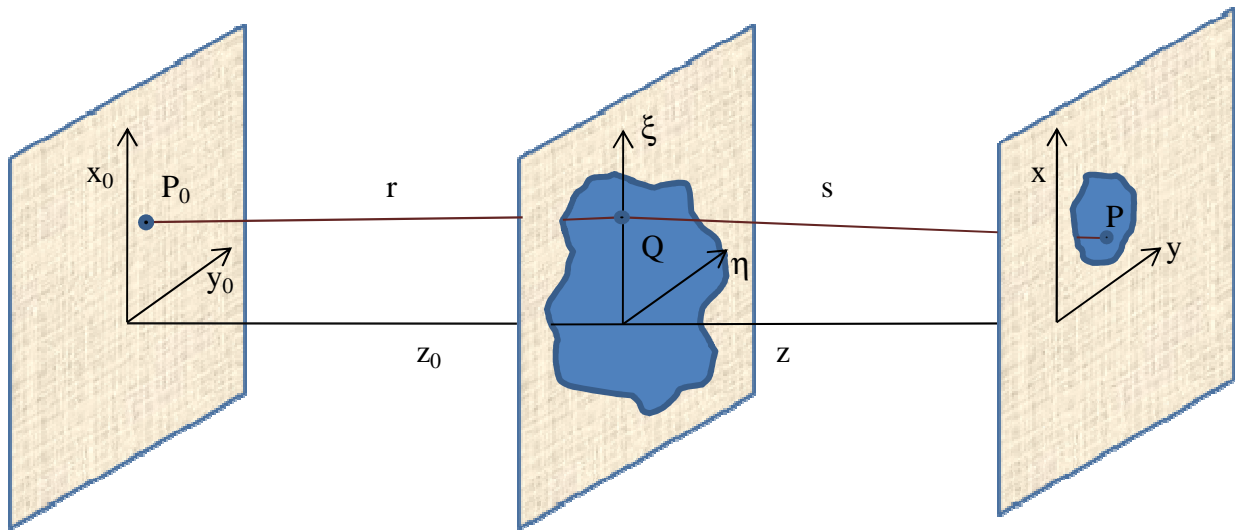


Figura 2-1. Diagrama que define las coordenadas de los planos involucrados en la transmisión de la luz por una abertura.

En la ecuación 5, α es una constante, z_0 la distancia entre el plano de la fuente y el plano de la abertura, z la distancia entre el plano de la abertura y el plano de la imagen. Las distancias r y s las trayectorias indicadas en el gráfico (Caufield, 1977). El dQ , representa un área elemental de la abertura en el punto Q .

El punto P_0 , representa una fuente puntual de luz que genera una onda esférica que se propaga por una distancia r hasta la abertura. Al encontrarse con esta abertura, el frente de onda se ve cortado por la pantalla en la cual se encuentra la abertura y solamente una parte tiene la posibilidad de continuar. De acuerdo con el principio de Huygens cada punto Q_i de la abertura es generador de un nuevo frente de onda esférico divergente. Por lo cual, este nuevo frente de onda quedará definido por la superposición de los frentes que parten de cada uno de estos puntos. Esta condición queda expresada en la ecuación ubicada en el plano de la pantalla.

Ec. 2- 7

$$A(x, y) = \frac{-i\alpha}{2\lambda} \frac{e^{ik(z+z_0)}}{z_0} e^{\frac{ik(x_0^2+y_0^2)}{2z_0}} e^{\frac{ik(x^2+y^2)}{2z}} \iint A(\xi, \eta) \cdot e^{ik\frac{\xi_0^2+\eta_0^2}{2}\left(\frac{1}{z_0}+\frac{1}{z}\right)} \cdot e^{-ik\xi\left(\frac{x_0}{z_0}+\frac{x}{z}\right)} \cdot e^{-ik\eta\left(\frac{y_0}{z_0}+\frac{y}{z}\right)} d\xi d\eta$$

Ecuación que representa el patrón de difracción de Fresnel de la función de apertura $A(\xi, \eta)$. Es evidente que con pequeños cambios en los valores de z y z_0 , se producen cambios importantes en la distribución de intensidades sobre la pantalla. En la ecuación 6 los términos (ξ, η) pueden ser eliminados para el caso particular en el cual la pantalla P es situada lejos de la abertura. Esta se conoce como la difracción de Fraunhofer o de campo lejano. Para que esto se cumpla es condición necesaria que:

$$z_0 \gg (\xi_0^2 + \eta_0^2)/\lambda$$

$$z \gg (\xi^2 + \eta^2)/\lambda$$

Siendo así, entonces la ecuación 6 puede ser escrita en la siguiente forma

$$A(x, y) = C \iint_{-\infty}^{\infty} A(\xi, \eta) \cdot e^{ik(p\xi + q\eta)} d\xi d\eta = CF[A(\xi, \eta)]$$

Ec. 2-8

Donde,

$$p = \left(\frac{x_0}{z_0} + \frac{x}{z} \right)$$

$$q = \left(\frac{y_0}{z_0} + \frac{y}{z} \right)$$

Además, \mathcal{F} denota la transformada de Fourier.

C es una constante que contiene diferentes valores constantes y términos de fase fuera de la integral, los cuales tienen importancia fundamental en la formación de las imágenes holográficas.

1.4. Holografía, reconstrucción de los frentes de onda.

Hasta ahora hemos visto como representar matemáticamente tanto el fenómeno de interferencia que da origen a la holografía como el de difracción que permite la reconstrucción de la imagen del objeto holografiado. Ahora, basándonos en los aspectos formales anteriormente indicados, nos iremos introduciendo lentamente en modelos específicos de la holografía que definen los conceptos generales de la formación de imágenes tridimensionales.

1.4.1. Holograma en línea de Gabor.

Para comenzar consideremos el arreglo mostrado en la figura 2-2, el cual fue usado por Gabor en sus primeras experiencias.

Un objeto semitransparente con zonas translúcidas y un fondo claro, es ubicado sobre la misma línea en la cual se ubican una fuente de luz y una película fotosensible, delimitando de esta manera un eje óptico de referencia. La fuente de luz, monocromática y colimada se centra con el eje óptico e incide en forma perpendicular a la placa fotosensible.

Cuando la luz proveniente de la fuente se encuentra con el objeto, se divide en dos partes. Por una parte está la luz que atraviesa la zona transparente del objeto. Por la otra, la que se encuentra con la parte translúcida y es dispersada por esta. El haz de referencia queda entonces constituido por la luz que se transmite e incide sobre la emulsión, sin cambios de fase en todo su frente, mientras que la dispersada es modulada por las características del objeto.

En el haz de referencia, tanto la fase como la amplitud no se ven alteradas a lo largo de toda la superficie de la placa fotográfica. Así, podemos tomar como referencia la fase constante de este haz, lo que deriva en una amplitud real. Por el contrario, la luz dispersada puede ser representada como una amplitud compleja debido a las variaciones de la transmitancia de las zonas translúcidas. Así, el haz del objeto toma la forma $o(x,y)$ donde $|o(x,y)| \ll r$.

Si consideramos la interferencia sobre cualquier punto de la pantalla, entonces debe cumplirse

$$I(x,y) = |r + o(x,y)|^2 = r^2 + |o(x,y)|^2 + r \cdot o(x,y) + r \cdot o^*(x,y) \quad \text{Ec. 2-9}$$

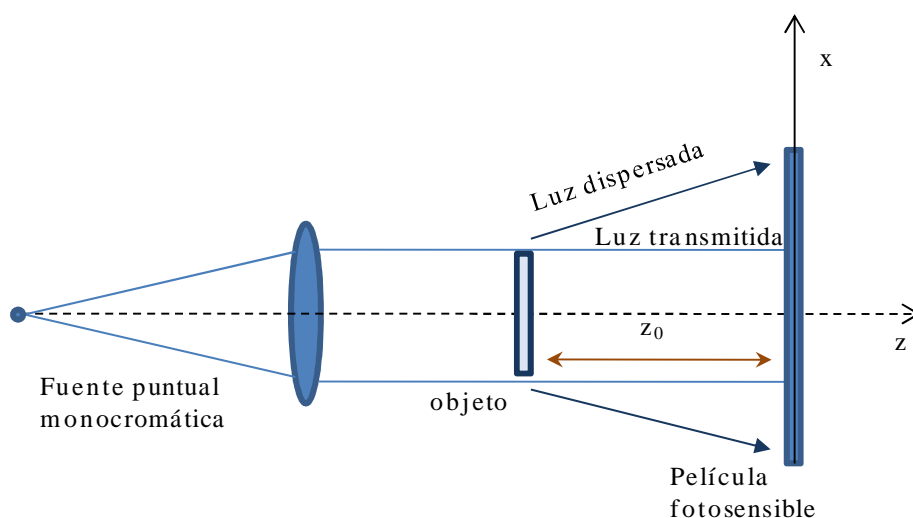


Figura 2- 2. Esquema óptico utilizado para grabar un holograma en línea de Gabor.

Por simplicidad, consideraremos que la luz transmitida a través del objeto depende de la transmitancia del mismo (relación entre la amplitud incidente y la transmitida hacia la película). Así las zonas translucidas tendrán un coeficiente de transmitancia mayor que las más opacas. Con el fin de modelarlo matemáticamente, esta simplificación puede ser representada mediante una ecuación lineal;

$$t = t_0 + \beta T I$$

Donde t_0 es la constante de transmitancia de fondo, β es una constante asociada con el tipo de medio de registro (película o CCD), T es el tiempo de exposición e I la intensidad resultante del patrón de interferencia. Así la ecuación 33 puede ser escrita en su representación sobre el plano de la película como:

$$t(x, y) = t_0 + \beta T [r^2 + |o(x, y)|^2 + r \cdot o(x, y) + r \cdot o^*(x, y)] \quad \text{Ec.2- 10}$$

Ecuación que representa la formación del patrón de interferencia que será registrado sobre el holograma.

Una vez registrado y procesado el holograma es posible obtener la reconstrucción de la imagen, lo que permitirá la observación del holograma. Nuevamente usando el modelo en línea de Gabor, deberemos reproducir las condiciones de iluminación dependientes del haz de referencia. Así el esquema óptico se utilizará nuevamente retirando el objeto de su posición original y ubicando la película en el punto en el cual había sido inicialmente instalada. Vale decir que el haz de referencia usado para la construcción del patrón de interferencia será ahora el haz que ilumine el holograma, presentando una intensidad mayor debido a la inexistencia del objeto translucido.

Matemáticamente la luz transmitida por el holograma puede ser representada en forma genérica como:

$$u(x, y) = t(x, y) \cdot r = r(t_0 + \beta T r^2) + \beta T r |o(x, y)|^2 + \beta r^2 o(x, y) + \beta r^2 o^*(x, y) \quad \text{Ec. 2- 11}$$

Ecuación que se divide en 4 términos, el primero representa la parte de la luz del frente de onda del haz de referencia que se ve atenuado y atraviesa el holograma sin verse afectada. El segundo término es de una intensidad resultante prácticamente nula por lo cual no afecta en forma significativa el resultado físico de la reproducción. Los terceros y cuartos términos son los relevantes ya que cada uno de ellos representa las respectivas imágenes del objeto.

El tercer término es idéntico al que originalmente consideramos como el proveniente de la luz dispersada por el objeto, pero afectado por el coeficiente β . Si observamos la figura 2-3 vemos que esta reproduce la imagen del objeto en su posición original y por lo tanto es divergente, condición que define la formación de una imagen virtual.

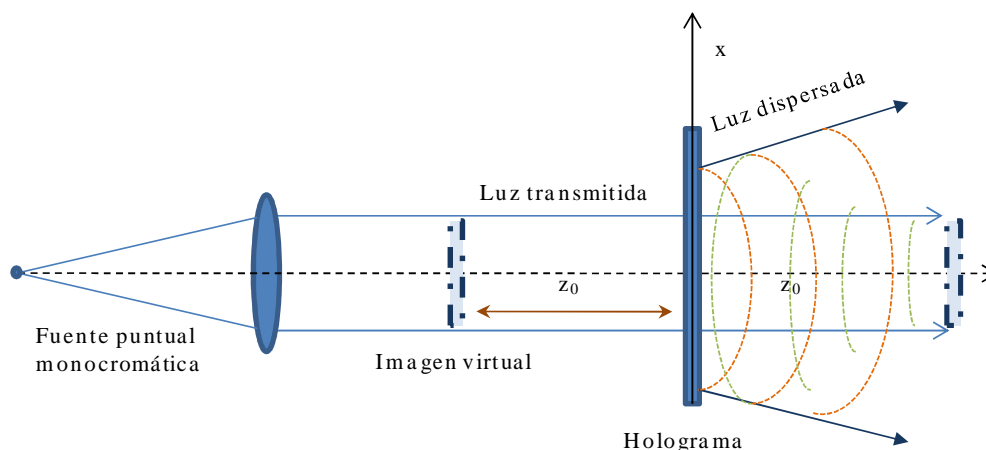


Figura 2- 3. Reconstrucción de la imagen en un holograma en línea de Gabor. El observador se ubica mirando hacia el holograma en el extremo opuesto a la fuente, así el total de la luz proveniente de la fuente se superpone sobre el plano de observación.

El término conjugado reproduce igualmente el frente de onda proveniente del objeto, pero dado que estamos hablando de frentes de onda compleja, su carácter de término conjugado hace referencia a un cambio en el sentido de curvatura. Esto es, se formará una imagen convergente y por lo tanto real del objeto. Así todo holograma presentará la formación de dos imágenes en forma contemporánea y equidistante de la película.

La principal limitación del holograma en línea es que el observador se ubicará en dirección a la fuente de luz durante la observación, lo que generará que tanto la luz transmitida, la imagen real y la imagen virtual se superpongan en el mismo trayecto.

1.4.2. Holograma fuera de línea o de Leith- Upatnieks

Antes de comenzar con el desarrollo matemático que demuestra las ventajas del holograma fuera de línea, es conveniente recordar que todo holograma es el resultado de un proceso de modulación entre dos señales [Caufield, 1979]. En este caso particular se trata de una modulación de fase entre una señal de portadora definida por el haz de referencia y una señal “mensaje” definida por el haz del objeto. Los modelos matemáticos que definen los procesos de modulación son bien conocidos y puede obtenerse de la teoría de la comunicación. El más simple de ser representado es el de modulación de amplitud usado en las transmisiones de radio de amplitud modulada. En esta una señal de alta frecuencia, normalmente superior a los 100 KHz, es usada como señal de portadora mientras que la señal de la voz con un ancho de banda mucho menor, es el que produce el cambio de amplitud en la señal de portadora. Así una señal de alta frecuencia es la que se transmite, pero la información se encuentra contenida en los cambios de amplitud.

Un holograma responde a principios similares solo que la modulación se produce sobre la fase de la onda y fundamentalmente se diferencia en que no es el aspecto temporal de la onda sobre el cual se interviene si no el aspecto espacial.

Para poder demostrar los mecanismos de reconstrucción de la imagen el esquema de Leith-Upatnieks resulta ser más conveniente. En este, las imágenes virtuales y reales se forman fuera de línea. La luz correspondiente al primer término de la ecuación 10 queda fuera del eje óptico de observación.

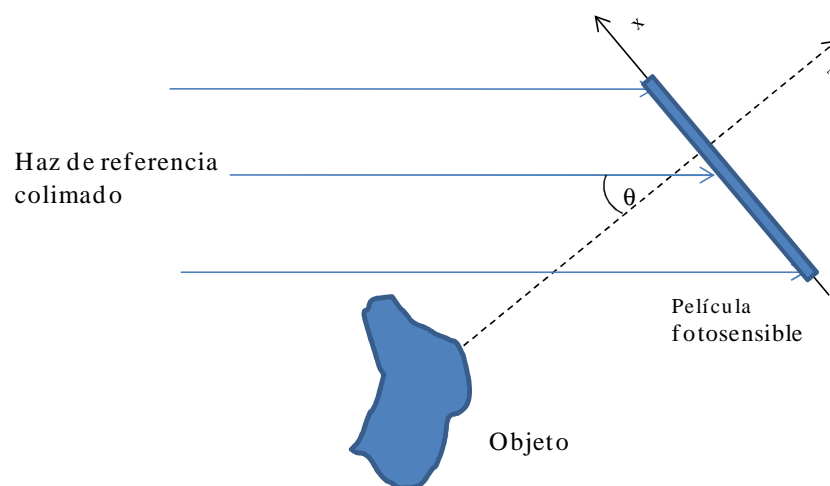


Figura 2- 4. Esquema que representa la construcción de un holograma de L-U, en el cual el haz de referencia y el haz del objeto presentan diferentes direcciones de incidencia sobre la película.

La diferencia fundamental con el holograma en línea radica en la división de los caminos ópticos, por una parte un haz ilumina el objeto y por la otra se direcciona el haz de referencia con un ángulo particular respecto de la película, durante la construcción del holograma.

En la figura 2-3 se muestra un esquema óptico para la implementación de este holograma.

En esta figura, puede verse claramente que el haz de referencia incide sobre la película con un ángulo θ diferente de 90° .

Para simplificar el modelo matemático asumiremos que el haz de referencia es colimado y de intensidad uniforme en todo su frente. La amplitud, compleja, dependiente del frente de onda proveniente del objeto puede ser representada a partir de:

$$o(x, y) = |o(x, y)|e^{-i\varphi(x, y)}$$

Definida como señal modulante, vale decir la señal que aporta la variación de la fase relativa asociada al objeto.

Mientras que la del haz de referencia (señal de portadora) como:

$$r(x, y) = re^{2\pi i \xi_r x}$$

Donde,

$$\xi_r = \frac{\sin(\theta)}{\lambda}$$

se denomina frecuencia espacial de la señal de portadora (asociada al haz de referencia sin modulación).

Es evidente que al haber definido una configuración como esta, la fase relativa del haz de referencia presenta una variación a lo largo del plano de la película. Esta variación de fase en x , es la que define la frecuencia espacial de portadora asociada a la función de la señal de portadora. Así, el proceso de construcción del holograma (señal transmitida) obedece a la modulación de fase que actúa sobre el haz de referencia, como consecuencia de la interferencia de dos frentes de onda.

Dado que los caminos ópticos se diferencian a partir del ángulo θ , la intensidad resultante que construirá el holograma sobre la película queda definida por;

$$I(x, y) = |r(x, y) + o(x, y)|$$

$$I(x, y) = |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 + r|o(x, y)|e^{-2\pi i \xi_r x}e^{-i\varphi(x, y)} + r|o(x, y)|e^{2\pi i \xi_r x}e^{i\varphi(x, y)}$$

$$I(x, y) = |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 + 2r|o(x, y)|\cos[2\pi i \xi_r x + \varphi(x, y)] \quad \text{Ec. 2-12}$$

De la ecuación 11 queda en evidencia que la intensidad resultante sobre la película, además de ser afectada por la intensidad de haz del objeto y del haz de referencia, queda definido por la modulación existente entre las fases relativas de la señal de referencia $2\pi i \xi_r x$ y la fase relativa del haz del objeto $\varphi(x, y)$.

Repitiendo el procedimiento establecido para el holograma en línea de Gabor para la reconstrucción del holograma. Considerando que la transmitancia de la película fotográfica guarda una relación lineal con la intensidad del patrón de interferencia resultante, entonces la ecuación sobre el plano de la película toma la forma:

$$t(x, y) = t_0 + \beta T \{ |o(x, y)|^2 + r|o(x, y)|e^{-2\pi i \xi_r x}e^{-i\varphi(x, y)} + r|o(x, y)|e^{2\pi i \xi_r x}e^{i\varphi(x, y)} \}$$

Donde β es un parámetro dependiente de la película, T es el tiempo de exposición y t_0 es un término constante dependiente de la transmitancia de la placa.

Para la reconstrucción de la imagen, luego de haber procesado la película, es necesario ubicar a esta en la misma posición que se encontraba durante la construcción. Si se respetan los ángulos

establecidos inicialmente, entonces es posible obtener la ecuación del frente de onda reconstruido como:

$$u(x, y) = t(x, y) \cdot r(x, y) = u_1(x, y) + \dots + u_4(x, y)$$

Dónde:

Ec. 2-13

$$u_1(x, y) = t_0 r e^{2\pi i \xi_r x}$$

$$u_2(x, y) = \beta T r |o(x, y)|^2 e^{2\pi i \xi_r x}$$

$$u_3(x, y) = \beta T r^2 o(x, y)$$

$$u_4(x, y) = \beta T r^2 o^*(x, y) e^{4\pi i \xi_r x}$$

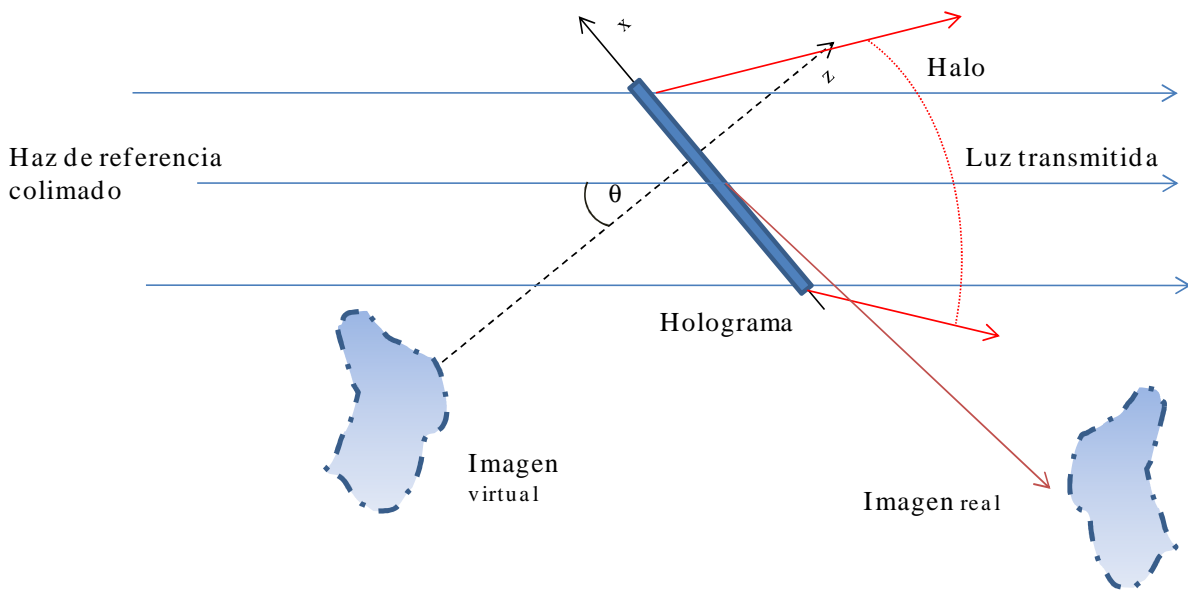


Figura 2- 5. Reconstrucción de la imagen en un holograma de L-U. El observador debe ubicarse mirando hacia el holograma en el extremo opuesto a la imagen virtual.

El primer término corresponde al haz de referencia atenuado luego de atravesar el holograma, siendo un frente de onda plano. Sobrepuesto y en forma de halo, se observa el segundo término de la ecuación. El tercer término, presenta una forma similar a la del objeto y por lo tanto será la que genere la imagen virtual del holograma. Al igual que en el holograma en línea de Gabor el cuarto término representa la imagen real.

Tanto la imagen real como la virtual, se encuentran desplazadas un ángulo θ y $\approx 2\theta$ respecto del haz de referencia lo que permite observar la imagen sin la superposición.

Es evidente que la existencia del ángulo θ entre el haz de referencia y el medio de registro, genera que las dos imágenes se encuentren en planos diferentes y por lo tanto no se superpongan. De esta manera los problemas presentes en el holograma en línea de Gabor son dejados de lado.

El mínimo ángulo θ que puede ser usado sin que existan superposiciones de las imágenes “gemelas” o bien del haz de referencia o del halo, queda determinado por la portadora de la frecuencia espacial ξ_r . La frecuencia de portadora mínima para evitar la superposición de las imágenes con el haz de referencia, puede ser obtenida a partir de la transformada de Fourier de los términos u_1 a u_4 de la ecuación 12 [Hariharan, 1996] [Caufield, 1979]. En el siguiente capítulo se muestra el desarrollo de un método práctico basado en las posiciones relativas del objeto y del haz de referencia, que permite determinar la posición de las imágenes reconstruidas respecto del centro del término de continua (Centro del haz de referencia en la imagen reconstruida) en holografía digital.

1.4.3. Holograma de Fourier sin lentes.

Una tercera alternativa para la reconstrucción de los frentes de onda es el planteo del holograma de Fourier y su correspondiente variante del holograma de Fourier sin lente. Si bien esta técnica no ha derivado en un uso intensivo en las aplicaciones de la holografía convencional, ha encontrado su lugar en la holografía digital.

Los hologramas de Fourier pueden definirse como hologramas de objetos planos, hologramas en los cuales el haz de referencia se ubica como una fuente ubicada en el mismo plano que del objeto. Para ser más precisos, este tipo de hologramas solo puede ser aplicado a objetos bidimensionales, existiendo una imposibilidad tácita de aplicación en objetos que se extiendan fuera del plano de entrada.

El nombre de holograma de Fourier deriva de la posibilidad de obtener la imagen del objeto a partir de la transformada de Fourier de los frentes de onda del objeto y del haz de referencia que luego interferirán sobre la película [Hariharan, 1996] (holografía convencional) o bien de la transformada de Fourier de la interferencia de ambos frentes de onda [Schnars, 2005] (holografía digital).

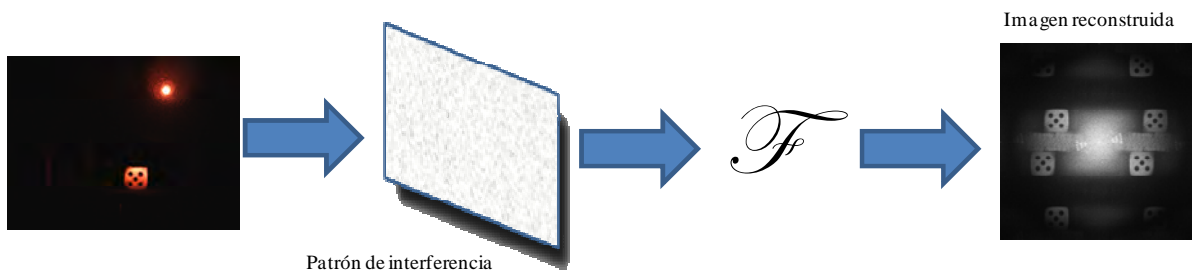


Figura 2- 6. Esquema que representa la formación de imágenes mediante la técnica de la holografía de Fourier sin lentes en holografía digital.

Por simplicidad, para modelar matemáticamente la reconstrucción de la imagen de este tipo de holograma, consideraremos un objeto de tipo plano y transparente. De esta forma, el haz que ilumina el objeto se ubica colimado y por detrás de él. Así, la luz transmitida a través del objeto habrá sido afectada por las propiedades del objeto. Esta, incidirá directamente sobre el medio de registro. El haz de referencia, será ubicado sobre el mismo plano de manera de poder considerar a este como una fuente puntual y de frente de onda esférico. Cada punto del objeto tendrá la posibilidad de generar un frente de onda también esférico $o(x_1, y_1)$, del mismo radio de curvatura del proveniente del haz de referencia. En la práctica un filtro espacial es usado como fuente del haz de referencia, siendo el tamaño de la abertura del orden de algunas micras.

Sobre el plano de la película el mismo punto podrá representarse con coordenadas $o(x_2, y_2)$, pudiéndose describir matemáticamente como:

$$o(x_2, y_2) = \frac{i}{z_0 \lambda} e^{\left[-i \left(\frac{\pi}{z_0 \lambda}\right) (x_2^2 + y_2^2)\right]} O(\xi, \eta) \quad \text{Ec. 2-14}$$

Donde z_0 es la distancia entre el plano del objeto y el plano del holograma y $\xi = \frac{x_2}{\lambda z_0}$, $\eta = \frac{y_2}{\lambda z_0}$, o bien como:

$$O(\xi, \eta) = \mathcal{F} \left\{ o(x_1, y_1) e^{\left[-i \left(\frac{\pi}{z_0 \lambda}\right) (x_1^2 + y_1^2)\right]} \right\} \quad \text{Ec. 2-15}$$

Esta expresión corresponde a la transformada de Fourier del haz del objeto, modificada por un factor de fase esférico. Factor que depende en todos los casos de la distancia entre el objeto y el medio de registro.

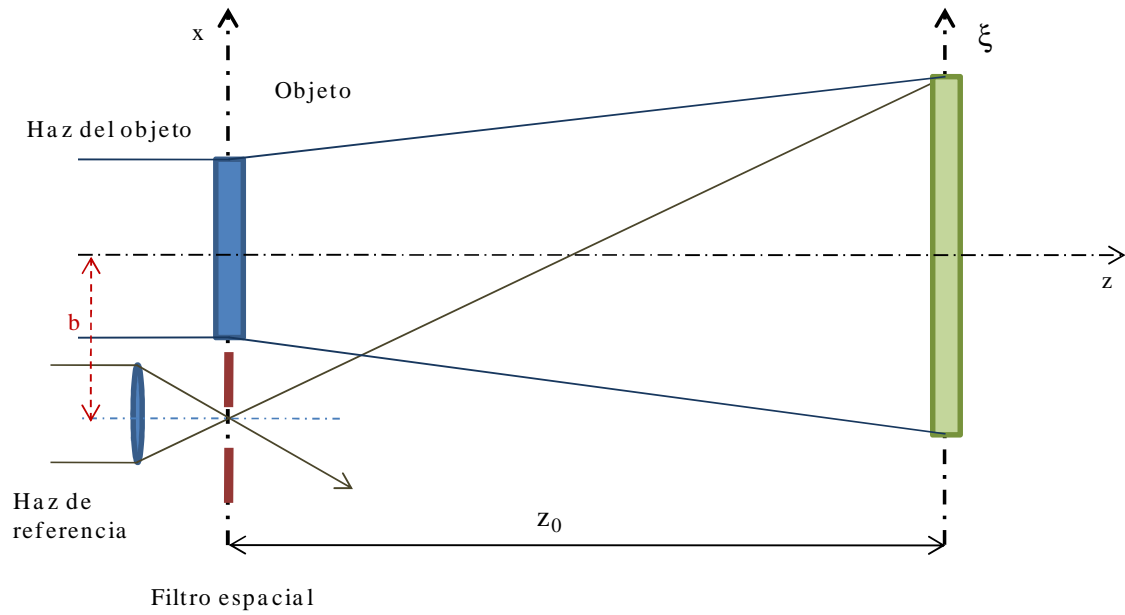


Figura 2- 7. Sistema óptico usado para la construcción de un holograma de Fourier sin lente [Hariharan, 1996].

Por otra parte el haz de referencia puede ser representado mediante su amplitud compleja, sobre el medio de registro como:

$$r(x_2, y_2) = r e^{-i\left(\frac{\pi}{z_0\lambda}\right)(x_2^2 + y_2^2)} e^{-i2\pi\xi b} \quad \text{Ec. 2-16}$$

Donde b es la distancia existente entre la fuente puntual del haz de referencia y el eje z. La intensidad resultante que da origen al patrón de interferencia queda definida por:

$$I(x_2, y_2) = r^2 + |o(x_2, y_2)|^2 + \frac{i}{z_0\lambda} O(\xi, \eta) e^{-i2\pi\xi b} + \frac{i}{z_0\lambda} O^*(\xi, \eta) e^{-i2\pi\xi b} \quad \text{Ec. 2-17}$$

En esta configuración, el efecto del factor de fase esférico asociado con la difracción de campo cercano del objeto, es eliminada mediante el uso de un haz de referencia esférico con el mismo radio de curvatura.

Posteriormente y ya en la descripción teórica de la holografía digital, volveremos sobre el modelo para sintetizar los aspectos particulares que envuelven el desarrollo de esta nueva técnica.

1.5. Reconstrucción de la imagen.

Hasta aquí hemos hablado y representado la formación de los frentes de onda provenientes del objeto y del haz de referencia, hemos analizado como interfieren y de que manera se forma la imagen. Además hemos representado matemáticamente los frentes de onda correspondientes a la reconstrucción de la imagen. En este punto corresponde hacer un análisis de la imagen reconstruida por el frente de onda correspondiente. Veremos que esta reconstrucción, dependerá de varios parámetros derivados del sistema óptico usado para la construcción del holograma y la posterior reconstrucción de la imagen.

Lógicamente que el análisis no podrá ser realizado sobre un objeto complejo por lo cual elegiremos un objeto puntual como caso de estudio. Nuestro objeto puntual se ubicará respecto de nuestro sistema óptico en la coordenada $O(x_0, y_0, z_0)$. Interferirá con un haz de referencia esférico proveniente de una fuente puntual ubicada en la coordenada $O(x_R, y_R, z_R)$, tal como se muestra en la figura 2-8.

De esta manera, la amplitud compleja del frente de onda proveniente del objeto sobre el plano de la película, en la coordenada $H(x_H, y_H, z_H)$, puede ser escrita como:

$$o_0 = |o_0|e^{-i\phi_0}$$

Así como también la del frente de onda del haz de referencia:

$$r_0 = |r_0|e^{-i\phi_r}$$

Donde ϕ_0 es la fase del objeto en el punto H con respecto a la fase en el punto O . Esta fase puede ser considerada como el camino óptico y puede ser representada mediante una aproximación de primer orden;

$$\phi_0 = \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{z_0} (x_H^2 + y_H^2 - 2x_H x_O - 2y_H y_O) \right] \quad \text{Ec. 2-18}$$

Por otra parte la fase de la amplitud compleja del haz de referencia en el punto H puede ser escrita como:

$$\phi_R = \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{z_R} (x_H^2 + y_H^2 - 2x_H x_R - 2y_H y_R) \right] \quad \text{Ec. 2-19}$$

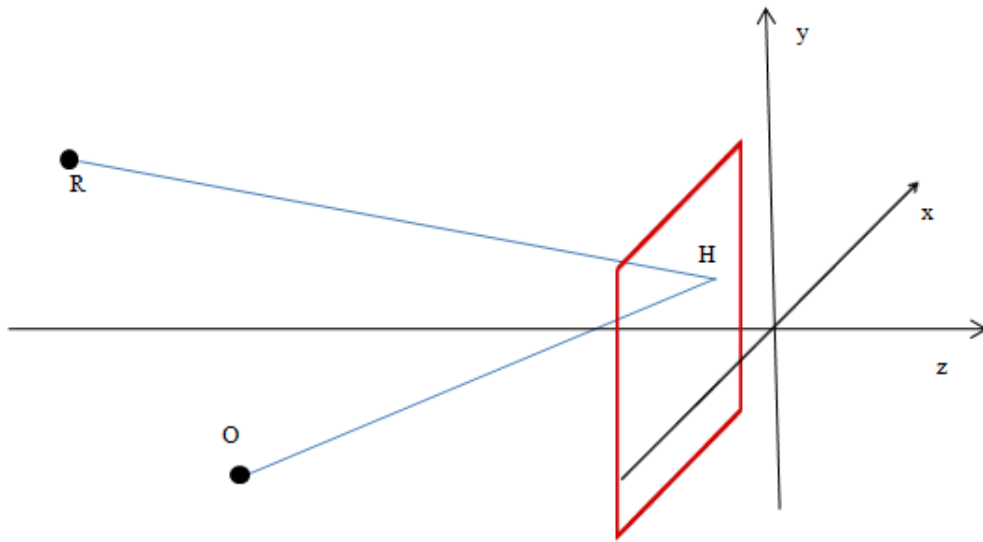


Figura 2- 8. Sistema de coordenadas usado para referenciar la formación del holograma.

Al superponerse ambos frentes de onda sobre la película, en el punto H , se generará un patrón de interferencia determinado por la diferencia de fase existente entre $\phi_0 - \phi_R$.

Una vez procesado el holograma, podemos iluminarlo con la misma longitud de onda usada para su construcción, una segunda longitud de onda o bien un espectro de longitudes de onda. La fuente estará ahora ubicada en el punto de coordenadas $P(x_P, y_P, z_P)$. De la misma manera, la amplitud compleja del frente de onda resultante en el punto $H(x_H, y_H, z_H)$, puede ser escrito como:

$$a_P = |a_P|e^{-i\phi_P}$$

$$\phi_P = \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{z_{OP}} (x_H^2 + y_H^2 - 2x_H x_P - 2y_H y_P) \right] \quad \text{Ec. 2-20}$$

Si consideramos un medio de registro lineal, de acuerdo con la ecuación 10, encontraremos que a partir de la transmisión del frente de onda de iluminación del holograma se formaran dos imágenes, tal como quedó definido en las ecuación 13.

$$u_3(x, y) = |a_P||r_0^*||o_0|e^{-i(\phi_P - \phi_R + \phi_0)}$$

Ec. 2-21

$$u_4(x, y) = |a_p||r_0||o_0^*|e^{-i(\phi_P + \phi_R - \phi_O)}$$

Si representamos en forma simplificada a $u_3(x, y) = |u_3|e^{-i(\phi_3)}$ podemos sustituir en las ecuaciones 19, 20, 21.

$$\phi_3 = \frac{\pi}{\lambda} \left[(x_H^2 + y_H^2) \left(\frac{1}{z_P} + \frac{1}{z_O} - \frac{1}{z_R} \right) - 2x_H \left(\frac{x_P}{z_P} + \frac{x_O}{z_O} - \frac{x_R}{z_R} \right) - 2y_H \left(\frac{y_P}{z_P} + \frac{y_O}{z_O} - \frac{y_R}{z_R} \right) \right] \quad \text{Ec. 2-22}$$

Puesto que el frente de onda representado por u_3 generará una imagen puntual, esta deberá ser un frente de onda esférico, el cual puede ser descrito por:

$$\phi_3 = \frac{\pi}{\lambda} \left[(x_3^2 + y_3^2 - 2x_H x_3 - 2y_H y_3) \left(\frac{1}{z_3} \right) \right]$$

Donde (x_3, y_3, z_3) son las coordenadas del punto imagen. Por lo tanto es posible definir el punto de coordenadas de la misma manera que lo hicimos en la ecuación 23, con el fin de definir la formación de la imagen.

$$\begin{aligned} x_3 &= \frac{x_P z_O z_R + x_O z_P z_R - x_R z_P z_O}{z_O z_R + z_P z_R - z_O z_P} \\ y_3 &= \frac{y_P z_O z_R + y_O z_P z_R - y_R z_P z_O}{z_O z_R + z_P z_R - z_O z_P} \\ z_3 &= \frac{z_O z_P z_R}{z_O z_R + z_P z_R - z_O z_P} \end{aligned} \quad \text{Ec. 2-23}$$

De la misma forma la imagen conjugada puede ser representada como:

$$\begin{aligned} x_4 &= \frac{x_P z_O z_R - x_O z_P z_R + x_R z_P z_O}{z_O z_R - z_P z_R + z_O z_P} \\ y_4 &= \frac{y_P z_O z_R - y_O z_P z_R + y_R z_P z_O}{z_O z_R - z_P z_R + z_O z_P} \\ z_4 &= \frac{z_O z_P z_R}{z_O z_R - z_P z_R + z_O z_P} \end{aligned} \quad \text{Ec. 2-24}$$

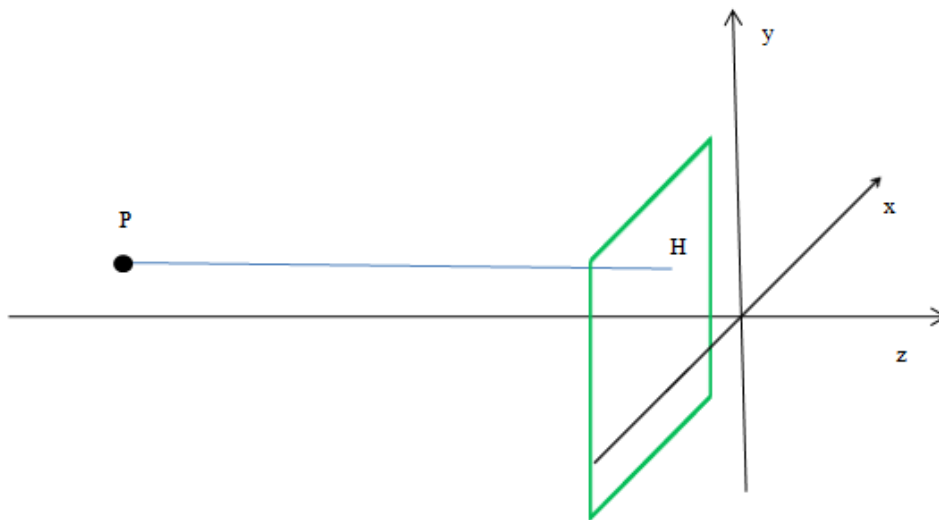


Figura 2-9. Sistema de coordenadas usado para referenciar la formación de la imagen.

1.6. Speckle.

“Speckle” es el término utilizado para describir el aspecto granulado que se observa sobre una superficie al ser iluminado con luz coherente. Es un efecto inevitable dado que es el resultado de la interferencia de la luz debida a caminos ópticos diferentes seguidos por esta a lo largo de la superficie rugosa del objeto. Por otra parte, el patrón puede ser definido como aleatorio y por lo tanto matemáticamente representable en forma estadística.

La existencia de este patrón ha dado origen a toda una nueva especialidad de la óptica física conocida como interferometría speckle. Sin embargo, en la holografía es un problema grave dado que genera pérdida de la información contenida en los frentes de onda.

1.6.1. Descripción del speckle.

Consideremos un modelo simplificado. En este, se ilumina mediante un haz circular de diámetro D , con una fuente de luz de longitud de onda λ , una superficie rugosa que introduce un cambio de fase aleatorio en el frente de onda incidente durante la reflexión. Por el principio de Huygens, cada punto del objeto iluminado es generador de un frente de onda, con una fase diferente y estadísticamente aleatoria. Así, no podremos predecir qué es lo que pasará en un punto determinado del espacio ya que la luz proveniente de la superficie del objeto contribuirá para la formación de una interferencia que será constructiva o destructiva. Así, podemos esperar la formación de un patrón de interferencia aleatorio con un marcado nivel de contraste. Por otra parte, el patrón de speckle se encuentra limitado por la difracción. Esto es, que si el tamaño del “grano” del objeto es mayor a la longitud de onda, entonces el patrón de speckle resultará modulado por patrones de difracción de diámetro:

$$d_s \cong \frac{\lambda L}{D}$$

Cuya longitud:

$$l_s \cong \frac{4\lambda L^2}{D^2}$$

Donde L es la distancia al medio de registro y D el diámetro de la zona iluminada.

En la figura 2-10 puede observarse como luz coherente de un láser de He-Ne genera un patrón de speckle sobre una fruta. Es evidente que sobre la superficie predomina el patrón y que la intensidad del mismo es variable punto a punto. Un histograma de la intensidad resultante puede dar una idea de la aleatoriedad del mismo y como el patrón cambia de punto a punto. Para un holograma el patrón de speckle representa un problema, dado que no es un frente de onda “limpio” el que se vería registrado sobre la película perdiéndose, entre otras cosas, definición en los bordes de los objetos.

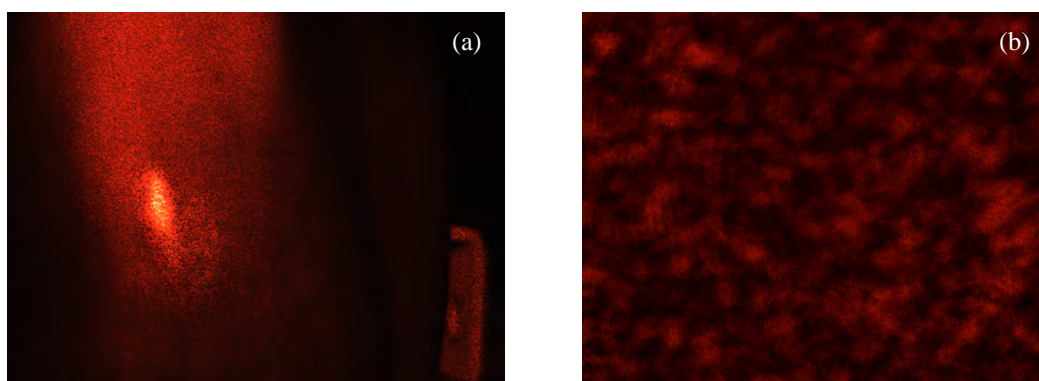


Figura 2- 10. (a)Patrón de speckle resultante de iluminar con láser de 632,8 nm, un pimienta. (b) patrón de speckle aumentado ópticamente.

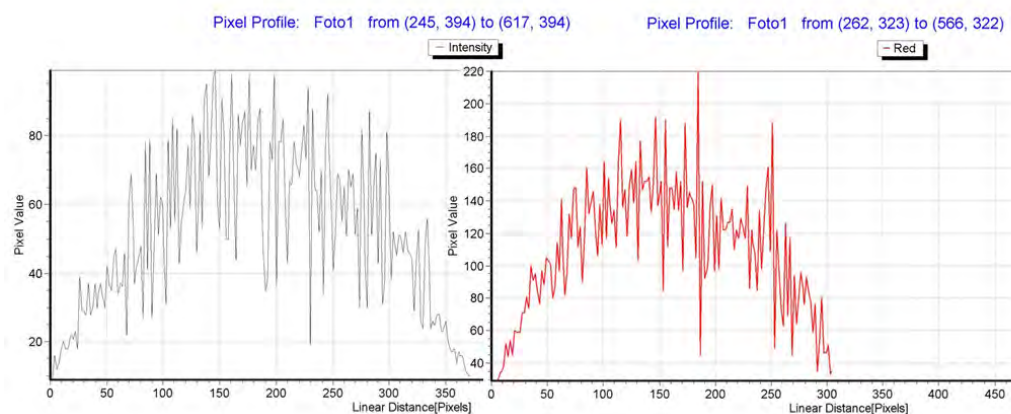
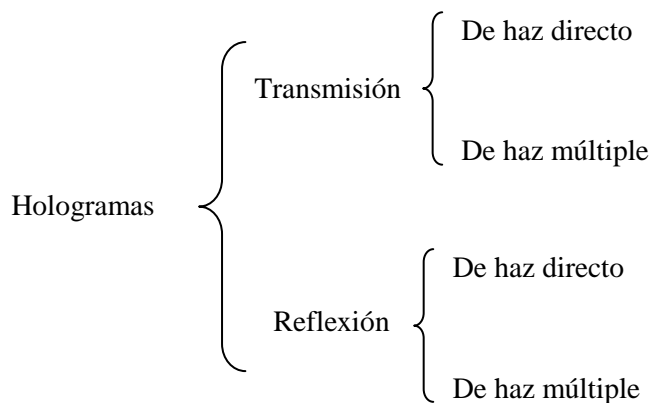


Figura 2- 11. Histograma de intensidades resultantes, sobre dos líneas horizontales del pimiento mostrado en la figura 2-10.

1.7. Práctica de la holografía.

Como hemos visto hasta ahora, existen diferentes modelos matemáticos que tienden a describir la construcción de la imagen holográfica. Sin embargo no hemos dado hasta ahora detalles de la implementación de las técnicas holográficas. Ciertamente, cualquier esquema óptico utilizado se encontrará dentro de alguno de los tres grandes grupos de hologramas: Fraunhofer, Fourier o Fresnel. Desde el punto de vista de la construcción práctica de un holograma, será necesario dar un salto de importancia desde los modelos teóricos a los prácticos, el cual comienza con una clasificación de las técnicas.

Este cuadro de clasificación, fija denominaciones que dependen de aspectos relacionados con la construcción del holograma, pero también de la reconstrucción de la imagen.



1.7.1. Holograma de haz directo.

Una alternativa al holograma de Gabor, cuando el objeto es opaco y se cuenta con un láser y película de mayor definición es el de haz directo. En este, la cantidad de elementos ópticos utilizados se minimiza, sin embargo es posible obtener muy buenas imágenes.

Un esquema de aplicación puede verse en la figura 2-14, donde se destaca que la principal limitación de este esquema es el estrecho ángulo de visión que se logra de la imagen.

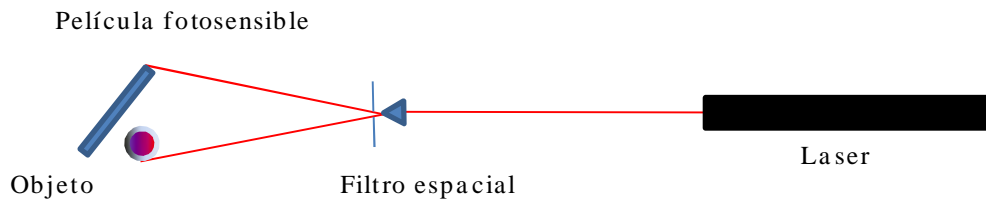


Figura 2- 12. Esquema general para la construcción de un holograma transmisión de haz directo.

El holograma de haz directo puede ser construido con estas limitaciones cuando es de transmisión, pero cuando se implementa una configuración por reflexión, los problemas de un ángulo de visión limitado desaparecen.

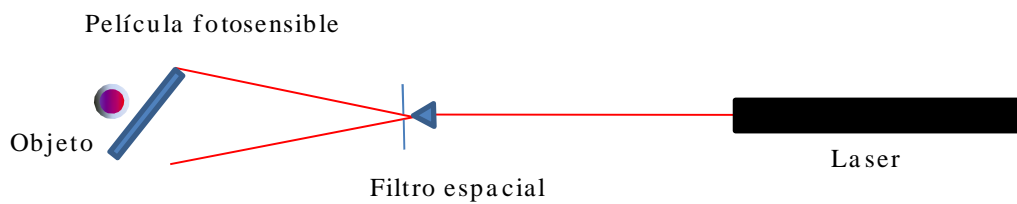


Figura 2- 13. Esquema general para la construcción de un holograma reflexión de haz directo.

Durante la reconstrucción, observar un holograma de haz directo de transmisión es como mirar a través de una ventana, en la cual existe una dirección de deslumbramiento y que marca los límites del ángulo de visión. De forma similar, podemos suponer que observar un holograma de haz directo de reflexión es como mirar un espejo, donde existiendo una fuente de luz deberá existir una dirección de deslumbramiento, relativamente estrecha.

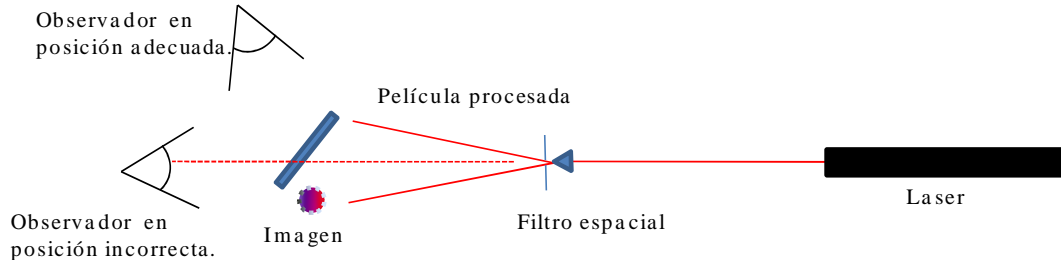


Figura 2- 14. Esquema general para la reconstrucción de un holograma transmisión de haz directo.

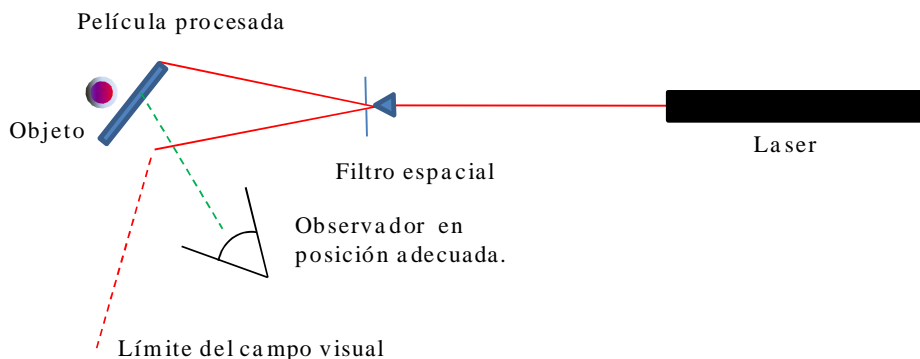


Figura 2- 15. Esquema general para la reconstrucción de un holograma reflexión de haz directo.

Los esquemas de haz directo son una buena opción a la hora de implementar prácticas simples para la obtención de hologramas, pero resultan poco útiles como esquemas aplicables a ensayos interferométricos de laboratorio.

1.7.2. Hologramas de haz dividido.

En los hologramas de haz dividido se busca mejorar la amplitud del campo visual, para esto el haz proveniente del láser es dividido en dos caminos ópticos diferentes mediante el uso de un divisor de haz. De esta forma el haz de referencia incide sobre la película fotosensible con un ángulo particular que permite ampliar el campo de visión. Se debe tener en cuenta que cuanto más grande es el ángulo de incidencia del haz de referencia mayor serán las necesidades de coherencia de la fuente de luz y de alta definición en la película fotosensible.

Un esquema típico para un holograma de haz dividido de transmisión puede verse en la figura 2-16.

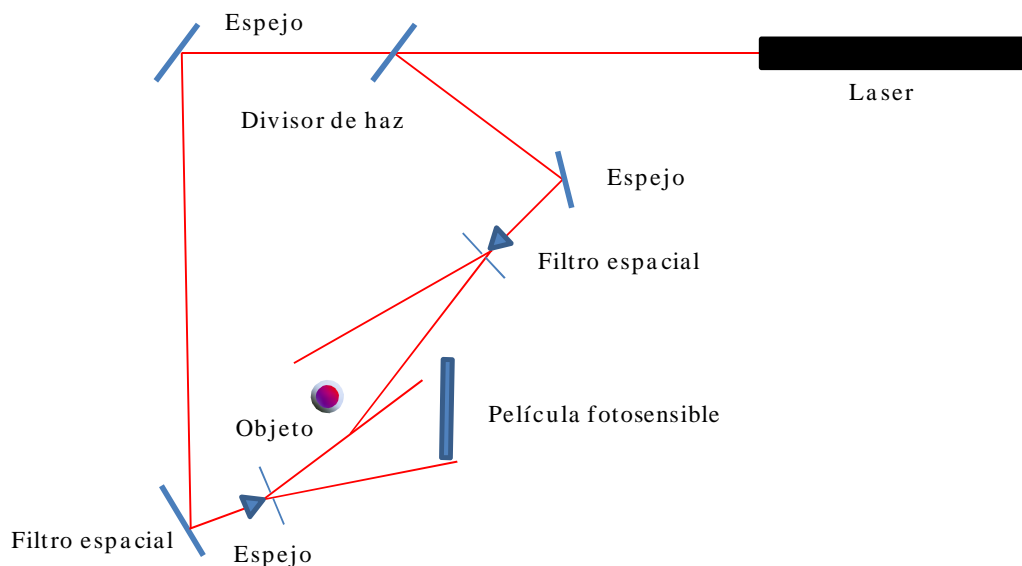


Figura 2- 16. Esquema general para la construcción de un holograma transmisión de haz dividido.

De igual forma que en el de haz directo, en el holograma de reflexión el objeto debe ubicarse por detrás del plano de la película. En estos no se obtiene mayores ventajas con un solo haz, sin embargo la utilización de más de un haz para iluminar a objeto mejora notablemente la imagen resultante.

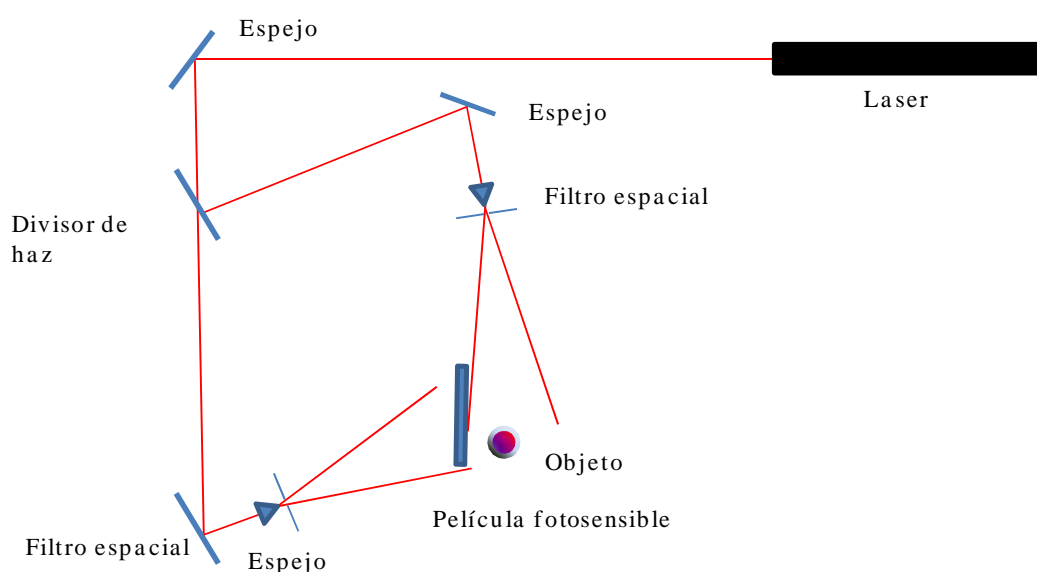


Figura 2- 17. Esquema general para la construcción de un holograma reflexión de haz dividido.

1.7.3. Elementos necesarios para la práctica de la holografía

Mesa de trabajo, condiciones de estabilidad y laboratorio.

Tal como lo definen las ecuaciones 20 y 24, cualquier movimiento de las coordenadas $o(x,y,z)$ respecto de las coordenadas de un punto del haz de referencia $R(x,y,z)$, generará sobre el plano de la película una reubicación de los frentes de onda, generando de esta manera un cambio en la formación del patrón de interferencia. Si este cambio va más allá de varias longitudes de onda se corre el riesgo de no obtener una imagen holográfica.

Por esto es fundamental contar con un sistema de montaje que evite movimientos relativos entre el haz de referencia y el objeto.

Por otra parte, el medio de registro debe permanecer igualmente en reposo, si este experimentara movimiento durante la formación del patrón de interferencia, entonces el holograma resultaría destruido. Por esto, el primer elemento a tener en cuenta en la práctica de la holografía es contar con un sistema o mesa de trabajo aislado de vibraciones y que permita un montaje firme de los

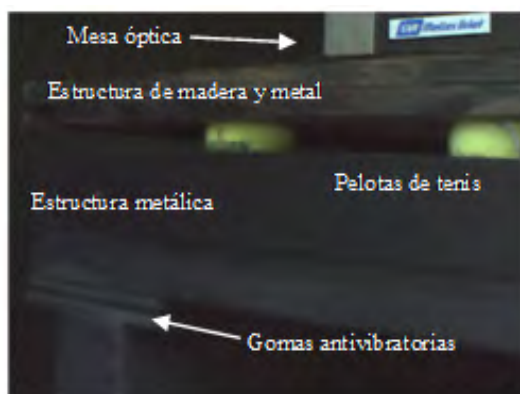


Figura 2- 18. Mesa de bajo costo construida en metal.

elementos ópticos. Ciertamente la compra de un sistema de alta estabilidad es el camino adecuado, sin embargo los costos de estos son sumamente elevados. Una posibilidad es la construcción de una mesa soporte aislada de vibraciones sobre la cual se monte una mesa óptica que garantice la estabilidad necesaria.

Esta mesa, puede ser fácilmente construida mediante la combinación de metal y madera a la cual se le instalan sistemas de aislamiento de vibraciones. Para esto se utilizan desde gomas industriales antivibratorias hasta simples bolas de tenis, convenientemente distribuidas.

Sobre la estructura plana de madera y metal es posible ubicar la mesa óptica propiamente dicha, solución en todos los casos muy segura. Una alternativa a la estructura de madera y metal es un bloque de granito de un espesor mínimo de 5 cm. Lógicamente que por el peso de este material deberán ser agregadas una mayor cantidad de pelotas. La ventaja de la estructura de madera y metal es la posibilidad de montar sobre esta, bases magnéticas que se adhieren para lograr un montaje firme. En la fotografía adjunta se observa un ejemplo de arquitectura de estas mesas de bajo coste construida con los elementos antes mencionados. Una vez montada la mesa óptica se debe proceder con la determinación de la estabilidad, para ello el esquema más simple es el del interferómetro de Michelson en su configuración habitual.

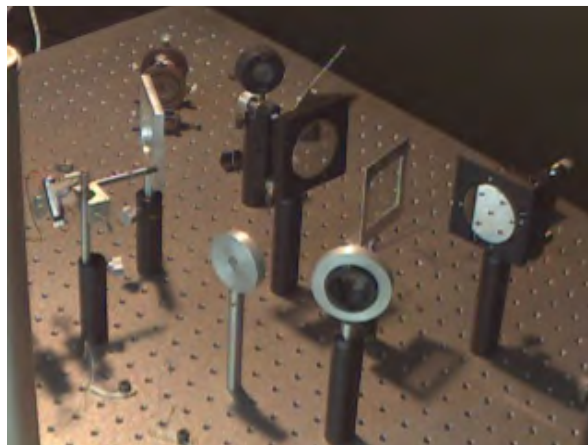


Figura 2- 19. Mesa con elementos de soporte de componentes ópticos.

Una vez montado este debe ser comprobado el nivel de aislamiento. Una forma simple es caminar en tono a la mesa, saltar y golpear paredes, buscando movilidad del patrón del interferómetro. Si se detecta movilidad del patrón, entonces es conveniente controlar el tiempo de duración de la oscilación. De esta forma uno podrá conocer las características de estabilidad.

Otras medidas a tener en cuenta en el montaje del laboratorio es que este debe tener aislación térmica y acústica. Tanto las variaciones repentinas de temperatura como niveles de sonido extremo pueden producir movilidad de los elementos ópticos que deriven en cambios de dirección de los haces. Una posibilidad simple es la de utilizar alfombras u otros elementos de revestimiento sobre las paredes y piso del laboratorio.

Las mesas ópticas son un elemento indispensable para una buena práctica de la holografía, estas garantizan un alto grado de rigidez mecánica y la posibilidad de montar mediante elementos auxiliares todo tipo de componentes ópticos.

Láser de Helio Neón.

El láser de He-Ne es uno de los láseres más popularmente usados, siendo el primer tipo de láser de gas en entrar en funcionamiento y el segundo láser en funcionar. Este puede ser catalogado como láser libre de problemas y presenta un muy buen período de vida útil (superior a los 20 años o 50000 horas de uso). Opera en una mezcla de gases Helio y Neón a baja presión, su sistema de bombeo es eléctrico con tensiones de encendido que superan los 10 kV y tensiones de funcionamiento del orden de los 1500 V. Emiten en diferentes longitudes de onda, la más común en 632,8 [nm] haciéndolo también en:

- 543.5 nm, verde.
- 594 nm, amarillo.
- 612 nm, naranja.
- 1523 nm, infrarrojo.

Las potencias van desde los 0,5 mW hasta los 50 mW para la longitud de onda del rojo. Potencias menores son alcanzadas en las otras longitudes de onda, siendo un láser de tipo continuo en su emisión.

Su principal característica es su alto grado de estabilidad lo que le confiere un elevado nivel de longitud de coherencia.

El láser de He-Ne, es la fuente de luz de mayor longitud de coherencia lo que la hace una herramienta indispensable para las aplicaciones en óptica y en particular en holografía e interferometría. Bien conocida es la situación respecto de la coherencia espacial, dado que el láser a partir de su cavidad resonante tiene la capacidad de oscilar en un solo orden, siendo preferible el TEM_{0,0}. Sin embargo no ocurre lo mismo con la coherencia temporal, dado que no es posible operarlos en una sola frecuencia longitudinal. Así se debe tener en cuenta que la máxima diferencia entre los caminos ópticos del haz de referencia y el del haz del objeto, no debe superar una distancia mayor a la longitud de coherencia.

Esta falta de coherencia temporal se debe particularmente a la forma simple de la cavidad resonante, construida mediante dos espejos. Las frecuencias resonantes dentro de esta vienen dadas por:

$$\nu_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{c}{2L}$$

Donde n es un número entero y c es la velocidad de la luz. Evidentemente que según los valores que tome n existirán diferentes frecuencias de resonancia dentro de la cavidad, sin embargo también existen condiciones de atenuación diferentes y solo alguna de ellas alcanzarán los niveles suficientes como para ser emitidas.

Con el fin de obtener una regla simple que nos permita construir un holograma con una buena calidad de imagen, suele decirse que:

En la práctica de la holografía, la diferencia de caminos ópticos entre el haz de referencia y el haz del objeto, no deberá superar la longitud del tubo del láser utilizado.

Ciertamente esta regla empírica es la forma más simple de evitar problemas en holografía y deberá tenerse especial cuidado de respetarla.

Como todo láser, este presenta un haz de salida de alta intensidad, por lo cual se deberán respetar ciertas normas de seguridad cuando se opere los mismos. Debe tenerse en cuenta que los reflejos directos o indirectos, especulares o difusos pueden ser altamente peligrosos para la visión, en función de la potencia que se esté utilizando. Es conveniente que existan indicadores luminosos durante su operación y se usen gafas protectoras. Los láseres usados en holografía no suelen ser peligrosos para la piel.

Componentes ópticos, el divisor de haz, lentes y espejos.

Los componentes ópticos son parte fundamental de la práctica de la holografía y no pueden ser usados lentes o espejos de uso cotidiano. En general estos presentan procesos constructivos especiales que los relacionan con la longitud de onda con la cual se desea trabajar.

Un elemento fundamental es el divisor de haz, este componente se encuentra construido con una fina placa de vidrio y permite obtener, de acuerdo con su tipo constructivo, diferentes niveles de intensidad transmitida o reflejada. Si bien existen diferentes calibraciones, lo usual es usar divisores 50/50. Si se trabaja con holografía fotográfica será necesario tener una relación entre haces diferente a esta dado que por las características de la película fotosensible el haz de referencia deberá ser unas 8 veces más intenso que el haz del objeto.

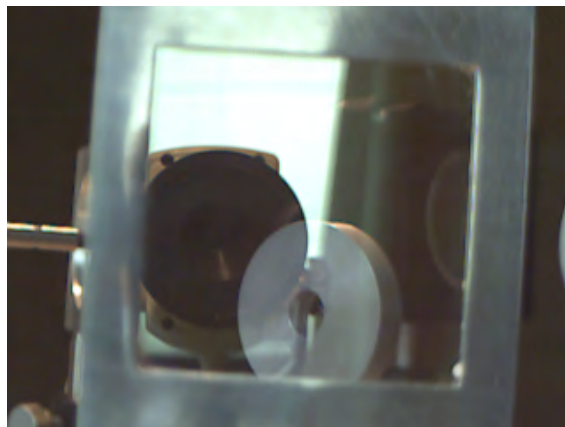


Figura 2- 20. Divisor de haz donde se ve la imagen de la cámara (reflejada) y la de un soporte (transmitida).

Sin embargo, en la holografía digital esto ya no se cumple y 50/50 es la proporción ideal.

En la holografía convencional, siempre existe la posibilidad de regular la intensidad por medio de la expansión final de cada uno de los haces.

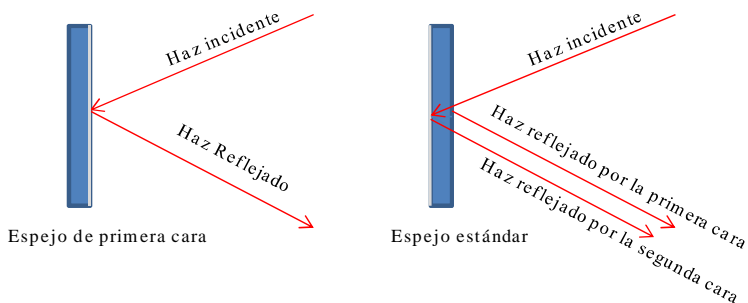
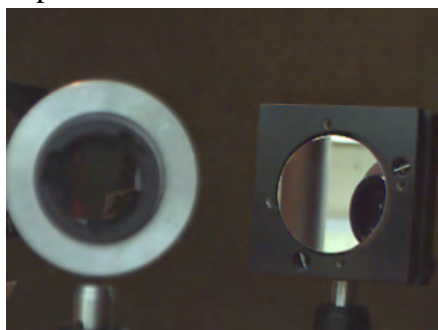


Figura 2- 21. Fotografía de un espejo metálico de primera cara y esquemas representativos de la diferencia entre este espejo y uno de uso corriente.

En general se evita el uso de lentes, esto debido la presencia de defectos constructivos en estas o bien daños por microorganismos que generan figuras de difracción no deseadas. En general para la expansión de los haces se hace uso de los filtros espaciales, los cuales eliminan parte de las frecuencias parásitas del láser y logran una apropiada expansión del haz.

El filtro espacial.

La holografía puede ser realizada sin la utilización de los denominados filtros espaciales, sin embargo en general la imagen obtenida es de muy baja definición y poco contraste. Para la obtención de imágenes de alta definición, que puedan ser aplicadas en ensayos por interferometría holográfica es necesario el uso de este elemento. Básicamente, el filtro espacial se compone de un objetivo de microscopio y una lámina metálica con una pequeña perforación que puede ir de los 5 a los 50 μm . La lente, de distancia focal extremadamente corta debe ser enfocada en la perforación. En esta condición solamente la luz que atraviesa la abertura en forma cuasi paralela al eje óptico seguirá su trayectoria divergente. Toda otra trayectoria, generada por fenómenos de difracción en la lente, polvo o frecuencias parásitas del láser las cuales siguen un camino óptico diferente, serán bloqueadas por la lámina metálica.

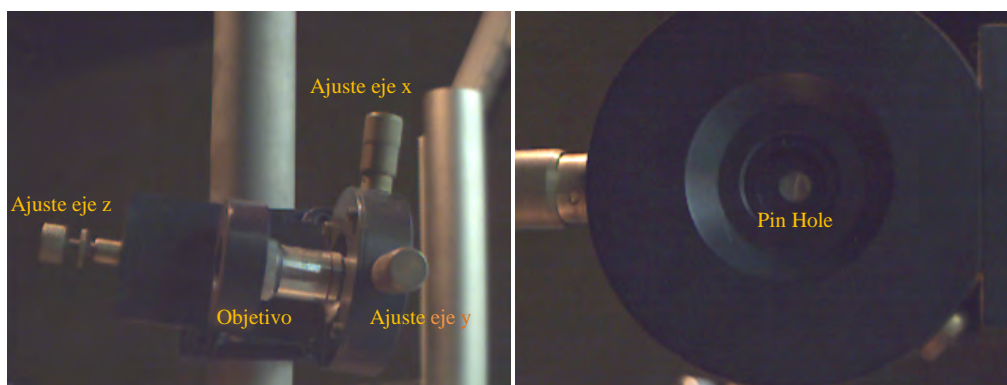


Figura 2- 22. Detalles de los componentes que integran un filtro espacial, con tres grados de libertad.

La operación del filtro espacial no es una tarea sencilla dado que se debe hacer coincidir el punto focal del objetivo de microscopio con la abertura o Pin –Hole. Generalmente existen tres grados de libertad para el posicionamiento del sistema, uno en el eje z que controla la posición del foco respecto de la perforación. Los otros dos la posición sobre el plano de la placa metálica. Cada uno de los actuadores se encuentra construido por tornillos de pasos micrométricos y todo el sistema debe tener una gran estabilidad en el movimiento. Es normal que para la puesta en marcha del filtro espacial se deban emplear varios minutos y hasta horas para una correcta distribución de la intensidad del haz de salida. En los sistemas modernos los actuadores pueden ser controlados por nanoposicionadores manejados desde un ordenador.

El interruptor de haz, para el control del tiempo de exposición.

Otro elemento de fundamental importancia para la práctica de la holografía es el denominado interruptor de haz. Su función es la de mantener obturado el haz justamente a la salida del láser. Para esto existen diferentes posibilidades, los de tipo iris o de apertura circular y los longitudinales de desplazamiento lineal. Cualquiera de ellos consta de un actuador electromagnético conectado a un controlador programable, en el cual se introducen los tiempos de exposición deseados.

Este es un elemento fundamental ya que la duración de la exposición de la placa holográfica a la luz del láser es uno de los parámetros fundamentales a definir en la realización de cada uno de los hologramas.

El porta placa.

Como último elemento a tener en cuenta como fundamental para la práctica de la holografía es el denominado porta placa. Esta denominación deriva del hecho que la mayor parte de la práctica de

la holografía se realiza sobre placas de vidrio sobre las cuales ha sido depositada la emulsión. En general un simple soporte metálico de las dimensiones de la placa holográfica, con algún elemento de ajuste cumplirá esta función convenientemente. Debe recordarse que no debe existir movimiento de la placa durante la construcción del holograma.

Sin embargo existen también películas holográficas, denominadas de esta manera por haber sido emulsionada una fina lámina flexible de acetato. El trabajar con este tipo de película es sumamente conveniente por el hecho que su costo es unas diez veces menor que el costo de la placa de vidrio. El inconveniente fundamental es como mantener a esta fina película fuertemente sujeta. La solución es bastante simple si se piensa que la forma más conveniente es pegar ésta a una placa rígida. Lo que se ha desarrollado como mejor solución es la utilización de una placa de aluminio recubierta en goma sobre la cual se deposita cemento de contacto. Si a este último se lo deja secar hasta el punto de perder adherencia sobre la piel, funcionará correctamente fijando la película de acetato sobre la goma, siendo una vez expuesta al laser, retirada fácilmente sin dañarla. La única precaución que debe tenerse es la de fijar la cara no emulsionada sobre el cemento de contacto.

La película holográfica.

Hace algunos años existían diferentes fabricantes de películas o placas holográficas, entre estos podíamos contar Agfa y Kodak como los principales. En la bibliografía de la década del 70 se puede encontrar toda clase de información sobre las emulsiones usadas hasta no hace mucho tiempo atrás. En los últimos diez años las grandes empresas han dejado de fabricar este tipo de películas restando en el mercado mundial como principal proveedor la empresa GEOLA de Lituania. La película fabricada por esta empresa, tiene algunas ventajas de importancia respecto a las de Agfa o Kodak, en particular su precio. Sin embargo es una película mucho más lenta, por lo que requiere de intensidades más elevadas o tiempos de exposición más largos.

Básicamente son películas fabricadas a partir de granos de nitrato de plata sumamente pequeños, de entre 0,02 y 0,06 μm , sensibilizados para un rango espectral estrecho y con una capacidad de definición de entre 3000 y 5000 líneas por milímetro. La intensidad necesaria para lograr una buena calidad de imagen se encuentra entre los 75 y 100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

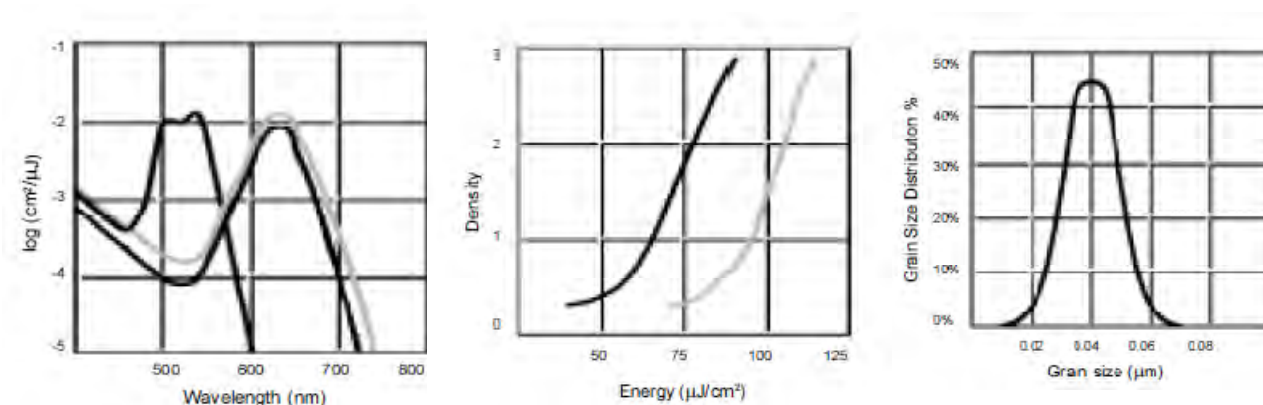


Figura 2- 23. Curvas de caracterización de la película holográfica Slavich PFG-01 de 3000 líneas/mm, suministradas por el fabricante.

Además de las películas holográficas de nitrato de plata existen toda otra serie de materiales como fotopolímeros, gelatinas dicromáticas, fotoplásticos, cristales fotorreactivos etc., que pueden ser usados para diferentes aplicaciones. Como veremos más adelante la utilización de cámaras de CCD se ha ido imponiendo como una alternativa para la realización de ensayos interferométricos.

Toda película fotosensible necesita de un procesamiento químico o revelado, existen para esto formulas específicas para cada tipo de holograma y cada tipo de película. Los fabricantes aconsejan que reveladores y procesos fueran necesarios para cada una de las aplicaciones.

En líneas generales los hologramas se revelan en procesos de cinco pasos:

- a- Revelado
- b- Fijado y lavado (normalmente en agua)
- c- Blanqueo
- d- Lavado
- e- Secado

Cada uno de estos pasos conlleva un tiempo particular donde el entrenamiento del laboratorista es fundamental para obtener buenos resultados. De estos cinco pasos el más crítico es el secado, un incorrecto proceso dañaría la emulsión generando “surcos” ópticos que dificultarían la observación de la imagen resultante.

Un correcto secado se realiza con el auxilio de un baño en una solución deshidratante y una suave corriente de aire frío como paso final.

Cámara de CCD para la observación del holograma.

La observación de un holograma procesado se logra luego de una serie de pasos cuyo objetivo es la determinación de la posición inicial de la película. El campo de observación, recorrido angular con centro en el centro del holograma, varía de acuerdo con el tipo de esquema óptico montado durante la construcción. Si se trata de un holograma de transmisión, el campo de observación se ubica entre los 60° y 120 ° mientras que en los hologramas de reflexión suele alcanzar los 160°.

Una vez posicionado el holograma, el ángulo de observación quedará definido por la ubicación del observador. Así, podrán verse las diferentes facetas del objeto holografiado, siendo el equivalente de mirar a través de una ventana.

En holografía interferométrica (HI), la información aportada por el holograma depende en gran medida de la posición del observador. Pequeños movimientos de la cabeza, sumados a la visión estereoscopia del ser humano, generan ambigüedades en la discriminación de las franjas. La utilización de una cámara de CCD permite eliminar este problema.



Figura 2- 24. Antiguo sistema de observación de hologramas [Caufield, 1979]

Ya en los años 70 esta tecnología era usada, naciendo así la denominada holografía digital. En la figura 2-23 se observa un antiguo sistema de digitalización de hologramas en el cual la observación del holograma se realiza sobre un monitor de TV con un ángulo fijo. Puede observarse también la

presencia de un controlador manual de posicionamiento de la cámara, lo que permitía definir la posición del observador.

Las cámaras usadas para este fin pueden ser de baja resolución, hoy podría ser usada hasta la cámara de un teléfono móvil permitiendo adquirir una imagen muy bien definida.

Brazo robotizado para el posicionamiento de la cámara.

Para lograr una rotación del ángulo de observación como forma de definir la posición de observación, emulando los sistemas documentados en la bibliografía [Caufield, 1979] [Hariharan, 1996], se diseñó y construyó un brazo pivotante extensible con la capacidad de rotar 170° . Para su construcción se utilizó un motor paso a paso de $1,3^\circ$ por paso sobre cuyo eje se montó el brazo propiamente dicho. Este, consistía de una estructura de perfiles metálicos introducidos uno dentro del otro. El perfil interior, con capacidad de desplazamiento en sentido radial, se encontraba perforado para sujetar la cámara utilizada en la observación del holograma.

Para el control sistema fue desarrollada una interfaz que permitía definir la posición, velocidad y sentido de la rotación.

El controlador electrónico permite la operación en forma manual desde dos pulsadores que habilitan un paso por cada vez que estos son oprimidos, uno por cada sentido de rotación. Una cámara de CCD de 1 Mpx con conexión USB es usada en este arreglo para la captura de las imágenes entregadas por los hologramas fotográficos.

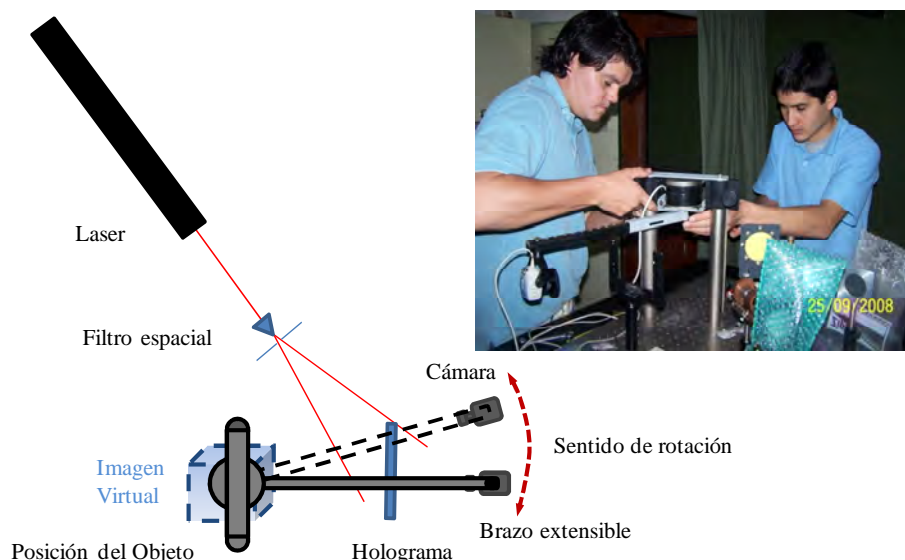


Figura 2- 25. Esquema óptico para la observación de hologramas, con variación del ángulo de observación. Montaje del brazo robotizado sobre la mesa óptica, a cargo de los Ing. Hernán Barrera y Diego Siboldi

1.7.4. El esquema óptico.

En la práctica de la holografía el montaje del esquema óptico es determinante del tipo de holograma. Así, podríamos montar esquemas de transmisión o reflexión. De transmisión de haz simple, de doble haz, de arcoíris o de volumen. En general para las aplicaciones de la holografía suele utilizarse el esquema óptico de doble haz como el mostrado en la figura 2-18.

En adelante, como esquema de aplicación, se optó por la utilización del de doble camino óptico de planos paralelos. En este esquema, el plano de la película se ubica paralelo al plano del objeto. Su principal ventaja radica en la posibilidad de contar con un campo de observación acotado, pero directamente enfrentado con el objeto. El haz de referencia proviene de una dirección cercana al plano del objeto, incidiendo con un ángulo lo suficientemente grande como para evitar la superposición de la imagen con el haz de iluminación durante la observación.

De esta forma, uno de los ángulos determinantes para la cuantificación de los ensayos por HI, será siempre de 0° coincidente con la normal al plano del objeto.

En la figura 2-26 se muestran dos diferentes esquemas adoptados en diferentes trabajos. Una vez calibrado el sistema óptico suele usarse como sistema de referencia y solo es modificado cuando las características del objeto así lo requieren. En la fotografía de la derecha puede observarse el porta placas descrito anteriormente y usado para el soporte de película de acetato. En un color más claro puede verse los restos del cemento de contacto usado en ensayos precedentes a la toma de esta fotografía. Cuando el porta placas llega a esta condición suele reemplazarse la superficie de goma sobre la cual se pinta el pegamento.

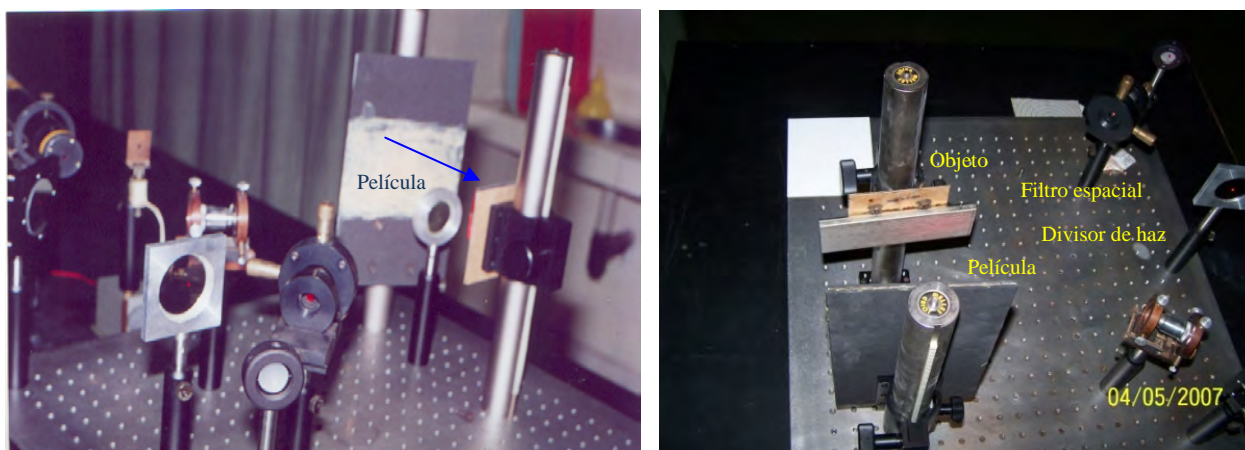


Figura 2- 26. Fotografías de dos esquemas de planos paralelos usados en la construcción de hologramas en diferentes tipos de ensayos.

1.7.5. Simulaciones computacionales como método complementario en la holografía.

En la actualidad existen diferentes métodos y software específicos para la realización de simulaciones computacionales. Particularmente aplicables en el estudio de deformaciones o procesos, tal como el método de elementos finitos (MEF). Otros software, inicialmente concebidos para la resolución de cálculos matemáticos han evolucionado hasta ser hoy aplicables en el tratamiento digital de imágenes. Así, mediante la utilización de estos programas es posible lograr herramientas de aplicación complementarias a la holografía. La holografía digital o la también llamada holografía sintética son casos particulares de aplicación.

En adelante, la utilización de programas como Matlab[®], Image plus[®], Video Point[®], Pixel Profile entre otros serán de aplicación permanente.

1.8. Principios generales de la holografía digital.

Si bien existen múltiples limitaciones el concepto de holografía digital no difiere del concepto de la holografía desarrollada por Gabor. Como se describió anteriormente existen dos etapas bien diferenciadas: la construcción y la reconstrucción del holograma. Durante la construcción la diferencia fundamental radica en el hecho que como medio de registro se utiliza un dispositivo de captura de imágenes digital o CCD (charge coupled device). Así, el holograma es grabado electrónicamente y almacenado digitalmente.

Normalmente, el objeto es tridimensional de dimensiones reducidas y capaz de generar una reflexión difusa de la luz.

En la reconstrucción óptica del holograma, la imagen virtual se ubica aproximadamente en la posición en la que se encontraba durante la construcción y la imagen real a una distancia d en una dirección opuesta. En la holografía digital ocurre un fenómeno similar, pero del proceso de reconstrucción se realiza numéricamente en el ordenador.

Básicamente todo el proceso asociado con la difracción puede ser descrito por la integral de Fresnel – Kirchhoff (Ecuación 7) y de acuerdo con la figura 2-27 la cual introduce un cambio de nomenclatura al solo efecto de respetar la bibliografía de referencia [Schnars, 2005].

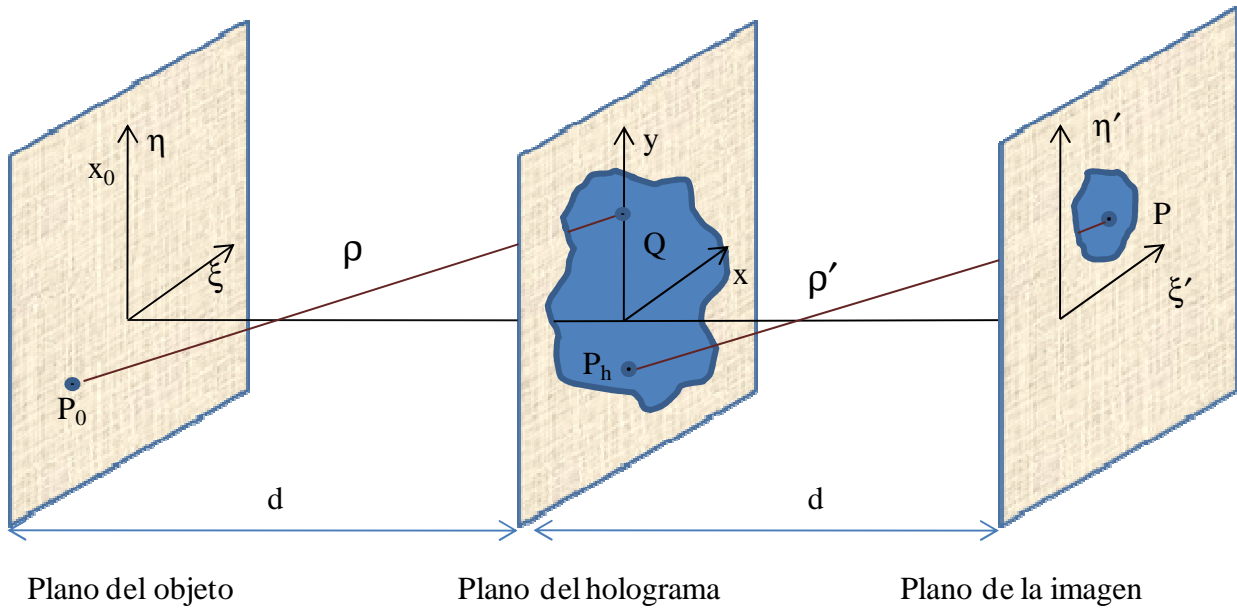


Figura 2- 27. Sistema de coordenadas para la reconstrucción numérica del holograma [Schnars, 2005].

$$A(\xi', \eta') = \frac{-i}{\lambda} \iint h(x, y) A_R(x, y) \frac{e^{-ik\rho'}}{\rho'} dx dy \quad \text{Ec. 2-25}$$

Donde

$$\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$$

La función $h(x, y)$ es la función que representa el holograma y $A_R(x, y)$ es la representación del haz de referencia. Además, ρ es la distancia entre los puntos P_0 y P_h del plano del objeto y del plano del holograma y ρ' la distancia entre el punto P_h y P del plano del holograma y del plano de la imagen respectivamente. En la ecuación 25 se ha considerado el factor de inclinación igual a 1 por simplicidad, el cual será mantenido en todos los modelos de reconstrucción.

El cambio de la función E_R por su conjugada representará la formación de la imagen virtual.

1.8.1. Reconstrucción numérica mediante la aproximación de Fresnel.

La aproximación de Fresnel se sustenta en considerar una distancia d mucho mayor que el tamaño del objeto y de la imagen reconstruía. Bajo estas condiciones físicas la ecuación 25 puede ser aproximada mediante una serie de Taylor.

$$\rho' = d + \frac{(x - \xi')^2}{2d} + \frac{(y - \eta')^2}{2d} - \frac{[(x - \xi')^2 - (y - \eta')^2]^2}{8d^3} + \dots \quad \text{Ec. 2-26}$$

Donde los términos de cuarto orden pueden ser descartados dado que son extremadamente pequeños comparados con la longitud de onda. En función de esto, la distancia entre planos de imagen y holograma resulta una combinación de términos cuadráticos y lineales. Haciendo consideraciones matemáticas [Schnars, 2005] resulta la ecuación denominada aproximación de Fresnel o transformada de Fresnel para la reconstrucción de la imagen real.

$$A(\xi, \eta) = \frac{ie^{-ikd}}{\lambda d} e^{-\frac{ik}{2d}(\xi^2 + \eta^2)} \iint h(x, y) A_R^*(x, y) e^{-\frac{ik}{2d}(x^2 + y^2)} e^{\frac{ik}{d}(\xi x + \eta y)} dx dy \quad \text{Ec. 2-27}$$

Mientras que para la imagen virtual resulta:

$$A(\xi', \eta') = \frac{ie^{-ikd}}{\lambda d} e^{+\frac{ik}{2d}(\xi'^2 + \eta'^2)} \iint h(x, y) A_R(x, y) e^{+\frac{ik}{2d}(x^2 + y^2)} e^{\frac{ik}{d}(\xi'x + \eta'y)} dx dy \quad \text{Ec. 2-28}$$

Ambas ecuaciones pueden ser redefinidas a partir de la transformada de Fourier inversa como:

$$A(v, \mu) = \frac{ie^{-ikd}}{\lambda d} e^{-i\pi\lambda d(v^2 + \mu^2)} \mathcal{F}^{-1} \left\{ h(x, y) A_R^*(x, y) e^{-\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)} \right\} \quad \text{Ec. 2-29}$$

Dónde:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad v = \frac{\xi}{\lambda d} \quad \mu = \frac{\eta}{\lambda d}$$

Esta expresión corresponde a un modelo matemático de reconstrucción de un sistema continuo y no discreto como el que resultaría de la utilización de un CCD. Así deberíamos pasar de la transformada de Fourier a la transformada discreta de Fourier. Para esto, deberemos considerar que el CCD se encuentra construido por una matriz de sensores de $N \times N$ (pixeles), que a su vez cada uno de estos sensores tiene dimensiones $\Delta x, \Delta y$.

$$A(m, n) = \frac{ie^{-ikd}}{\lambda d} e^{-\frac{ik}{2d}(m^2\Delta v^2 + n^2\Delta\mu^2)} \sum_{w=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(w, l) A_R^*(w, l) e^{-\frac{ik}{2d}((w\Delta x)^2 + (l\Delta y)^2)} e^{i2\pi(wm\Delta x\Delta v + ln\Delta y\Delta\mu)}$$

Para $m=0, 1, 2, \dots, N-1$ y $n=0, 1, 2, \dots, N-1$

Aplicando conceptos propios de la transformada de Fourier

$$\Delta v = \frac{1}{N\Delta x} \quad \Delta\mu = \frac{1}{N\Delta y} \quad \Delta\xi = \frac{\lambda d}{N\Delta x} \quad \Delta\eta = \frac{\lambda d}{N\Delta y}$$

Podemos definir la denominada transformada discreta de Fresnel;

Ec. 2-30

$$A(m, n) = \frac{ie^{-ikd}}{\lambda d} e^{-\frac{ik}{2d}\left(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)} \sum_{w=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(w, l) A_R^*(w, l) e^{-\frac{ik}{2d}((w\Delta x)^2 + (l\Delta y)^2)} e^{i2\pi\left(\frac{wm}{N} + \frac{ln}{N}\right)}$$

De la ecuación 30 queda en evidencia que la transformada de Fresnel la cual permite la reconstrucción de la imagen, se obtiene mediante el producto de la matriz del holograma y la matriz referencia, además de un factor exponencial esférico que modula la matriz referencia. A esto se le aplica la transformada inversa de Fourier o lo que resulta más efectivo la transformada rápida de Fourier FFT. El factor constante, antes de las sumatorias, puede ser descartado dado que afecta el total de la fase. Esto, siempre que busquemos la reconstrucción del holograma de amplitud.

Se debe tener en cuenta que, para la reconstrucción se deberá introducir un algoritmo de lente digital y que el holograma se encuentra limitado físicamente por la relación de la distancia d y el tamaño del píxel [Schnars, 2005].

1.8.2. Reconstrucción numérica por aproximación de convolución.

El procesamiento mediante la ecuación de Fresnel-Kirchhoff sin ningún tipo de aproximación, resulta sumamente compleja requiriendo un elevado tiempo de procesamiento. Un método más eficiente es el denominado de convolución o aproximación por convolución.

Partiendo de la ecuación 25 la cual puede ser interpretada como una integral de superposición, donde:

$$g(\xi, \eta, x, y) \frac{e^{-ik\rho'}}{\rho'}$$

Es la respuesta al impulso de un sistema invariante en el espacio. A partir de esta consideración, es posible aplicar el teorema de convolución.

$$\mathcal{F}[E_R^*(x, y)h(h, y) * g(\xi, \eta, x, y)] = \mathcal{F}[E_R^*(x, y)h(h, y)]\mathcal{F}[g(\xi, \eta, x, y)]$$

Siendo así, al obtener las transformadas de Fourier individuales para luego calcular la transformada inversa del producto, conseguimos en forma simplificada una expresión de la función imagen.

En un sistema discreto, limitado por las características del CCD, la función g toma la forma:

$$g(h, l) = -\frac{e^{-2k\sqrt{d^2 + \left(h - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}}}{\sqrt{d^2 + \left(h - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta x^2 + \left(l - \frac{N}{2}\right)^2 \Delta y^2}}$$

Y la matriz imagen resultante:

Ec. 2-31

$$I(\xi, \eta) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[hE_R^*]\mathcal{F}[g]\}$$

La reconstrucción por el método de convolución introduce como mejora la posibilidad de obtener una mayor resolución si el tamaño de los píxeles es lo suficientemente pequeño. Además, este método permite introducir un coeficiente de magnificación de la imagen a partir de un aumento numérico de la distancia d .

1.8.3. Reconstrucción numérica por Fourier.

En la bibliografía y publicaciones consultadas el método de reconstrucción numérico más usado es el denominado de Fourier sin lentes [Valin, 2005], [Valin, 2009] [Gombkotó, 2002].

Este, no solo contempla particularidades de procesamiento sino que también de montaje del sistema óptico, el cual debe ser definido de manera que el frente de onda del haz de referencia sea generado por una fuente puntual ubicada en el mismo plano que el haz del objeto. Así, ambos frentes de onda presentan igual desarrollo esférico.

El frente de onda del haz de referencia queda definido por:

$$E_R = \frac{e^{-ki\sqrt{d^2 + x^2 + y^2}}}{\sqrt{d^2 + x^2 + y^2}} \approx \frac{1}{d} e^{ikd} e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)}$$

Donde la fórmula de reconstrucción viene dada por:

$$I(\xi, \eta) = C e^{i\frac{\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)} \mathcal{F}^{-1}\{h(x, y)\}$$

Ec. 2-32

$$\mathcal{F}^{-1}\{h(x, y)\} = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} h(n\xi, l\eta) e^{-i\frac{2\pi(n\xi, l\eta)k}{N}}$$

Siendo c una constante compleja. El factor de fase esférica, $e^{\frac{-i\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)}$ es eliminado a partir de considerar un frente de onda esférico de referencia con igual curvatura, tal como se muestra en la figura 2-28.

La imagen reconstruida por Fourier, presentará durante su reproducción la presencia de la imagen real como virtual. Dependiendo del esquema óptico implementado, la posición del objeto y del haz de referencia así como también de la cantidad de píxeles del CCD usado, se apreciarán ambos gemelos (imagen virtual y real), así como también armónicos de orden superior

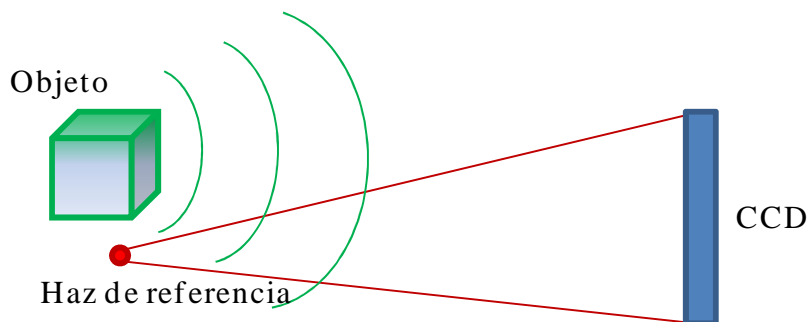


Figura 2- 28. Esquema general de un holograma sin lente de Fourier.

1.9. Práctica de la holografía digital.

Previamente se mostraron los tres métodos fundamentales de reconstrucción de la imagen en la holografía digital. Resta ahora, seleccionar el método más adecuado sobre el cual desarrollar un algoritmo para el procesamiento de la imagen. A diferencia de la holografía fotográfica, en la holografía digital no solo cambian los arreglos ópticos, también lo hacen los algoritmos de reconstrucción. Debemos por lo tanto definir un criterio de selección del algoritmo sobre el cual implementar la práctica de la holografía. El criterio de selección implica la consideración de una serie de parámetros que influyen sobre la posibilidad de aplicación de cada uno de los métodos.

El primer criterio, es sin dudas el de considerar los antecedentes y áreas de aplicación de cada uno. En las publicaciones consultadas vemos que mayormente se utilizan los algoritmos de convolución y Fourier, el primero de ellos en aquellos trabajos en los cuales se documentan aplicaciones específicas en temas tales como la codificación de información [Valin, 2009]. En cuanto al método de Fourier, vemos que es el que por excelencia se aplica en el desarrollo de las técnicas holográficas, HID (Holografía Interferométrica Digital) y ensayos no destructivos [Hipp, 2004].

Si consideramos el tiempo de procesamiento de cada uno de los métodos, vemos nuevamente que el algoritmo de Fourier es el más eficiente. Esto, como consecuencia del aumento de la capacidad de adquisición de CCD, haciéndose cada vez más grande el tamaño de las imágenes (posteriormente convertidas en matrices). Por otra parte, es un aspecto importante a tener en cuenta la capacidad y velocidad de procesamiento de los ordenadores. Relacionado con esto, debemos considerar que un objetivo trascendente de este trabajo es lograr la implementación de ensayos no destructivos y en lo posible aplicables fuera de laboratorio. En este caso la posibilidad de procesar en un ordenador portátil es fundamental.

Respecto del sistema óptico, vemos que si bien los métodos de Fresnel o convolución pueden ser contruidos con o sin lentes auxiliares, el planteo se sustenta fuertemente en considerar la aplicación de frentes de ondas planos. Para ello es necesario el uso de sistemas colimadores, componente óptico que no se encuentra disponible en todos los laboratorios y cuyo costo es elevado. De experiencias anteriores en la aplicación de técnicas holográficas convencionales en las cuales se indicaba el uso de colimadores como elementos absolutamente necesarios, los resultados nos han demostrado que esto es así únicamente cuando se desea obtener una imagen real bien definida. La imagen virtual es generalmente invariante ante un frente de onda de reconstrucción esférico o plano.

En función de lo antedicho, es evidente que la implementación del algoritmo debe sustentarse fundamentalmente en la aplicación del método de Fourier.

1.9.1. Desarrollo del algoritmo de reconstrucción de la imagen.

Todo holograma tiene como origen la captura de un patrón de interferencia sobre el medio de registro utilizando, ya sea una emulsión fotosensible o una cámara de CCD. Este definirá la distribución de intensidades sobre el medio de acuerdo con la ecuación 12, pero para su visualización será necesario reconstruir la imagen. El proceso de revelado transforma el medio de registro fotosensible en una red de difracción que regenerará la imagen al paso de la luz. Sin embargo en la holografía digital la regeneración de la imagen debe ser realizada en el ordenador y por lo tanto debe existir un algoritmo que permita obtenerla.

Tal como lo enunciamos en el párrafo anterior, el algoritmo de reconstrucción que implementaremos toma su núcleo del método de Fourier y por lo tanto de la ecuación de Fourier (ecuación 34). Básicamente un programa deberá tener la capacidad de:

- Adquirir la imagen desde el CCD o bien desde una posición de memoria en un formato conocido: .BMP, .JPEG etc.
- Convertir la imagen en una matriz numérica, con una escala de color o de grises que pueda ser procesada.
- Permitir ingresar los parámetros ópticos que puedan afectar el resultado de la reconstrucción.
- Tener la capacidad de aplicar herramientas matemáticas de cálculo.
- Permitir la visualización de la imagen resultante en la pantalla y grabarla en un formato conocido: .BMP, JPEG, etc.

Dadas estas exigencias, vemos como una elección casi natural el uso del software Matlab[®], el cual permite satisfacer todo el espectro de necesidades, desde la posibilidad de programación a la existencia de funciones de cálculo ya implementadas, tales como la FFT.

El algoritmo resultante, si bien con diferentes versiones y de características dinámicas en su evolución, es el que responde al diagrama de flujo de la figura 2-29.

1.9.2. Desarrollo del sistema óptico.

En holografía digital el medio de registro posee una definición, relacionada con el tamaño del píxel, unas 100 veces menor que el utilizado en holografía fotográfica. Por esto el esquema fundamental para la implementación de la holografía digital se sustenta en el holograma de Gabor de haz dividido. Para la construcción del sistema el objeto es iluminado desde un ángulo particular, sin mayores restricciones y con el objeto alineado con la cámara. La distancia entre el objeto y la cámara dependerá de las características del CCD y el tamaño del objeto.

El haz de referencia se introduce mediante un divisor de haz ubicado a 45° respecto de la línea que une el objeto con el CCD. De esta forma, ambos frentes de onda incidirán con un ángulo cercano a 0° sobre el CCD.

Debe recordarse que por tratarse de un holograma de Fourier sin lentes, ambos frentes de onda deben poseer el mismo ángulo de divergencia.

En la figura 2-30 puede observarse un esquema como el indicado anteriormente.

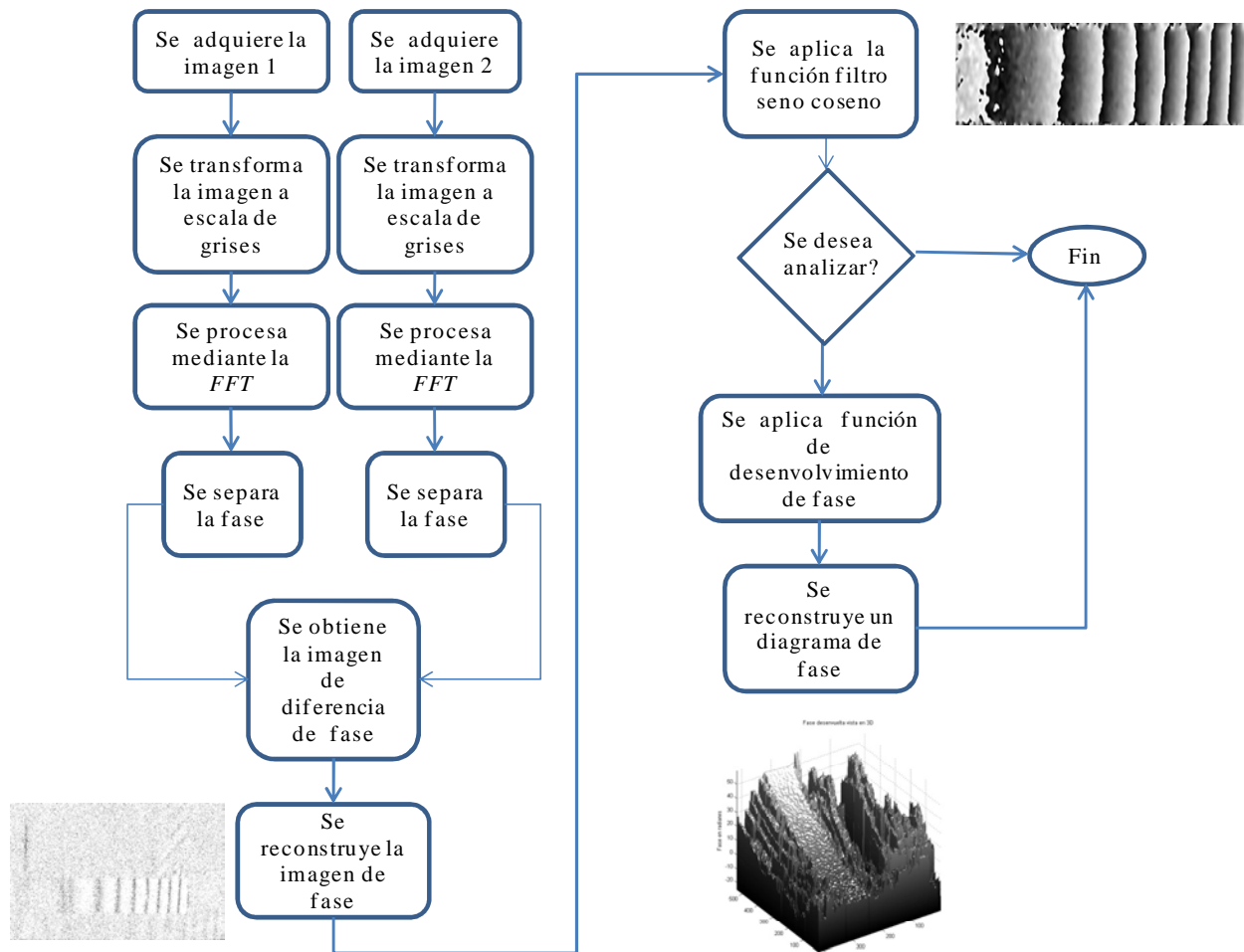


Figura 2- 29. Diagrama de flujo aplicado en el programa de obtención de un holograma de amplitud

La introducción del divisor de haz como elemento de direccionamiento del haz de referencia presenta una serie de inconvenientes a ser resueltos. Por una parte los, caminos ópticos de cada una de las trayectorias (cámara-objeto, filtro-cámara), deben ser aproximadamente iguales y presentar un ángulo de divergencia acotado y de igual magnitud. Por la otra, el balance de intensidades deberá ser siempre de 1:1 entre el haz del objeto y el haz de referencia, situación difícil de ser lograda sin el uso de elementos ópticos auxiliares.

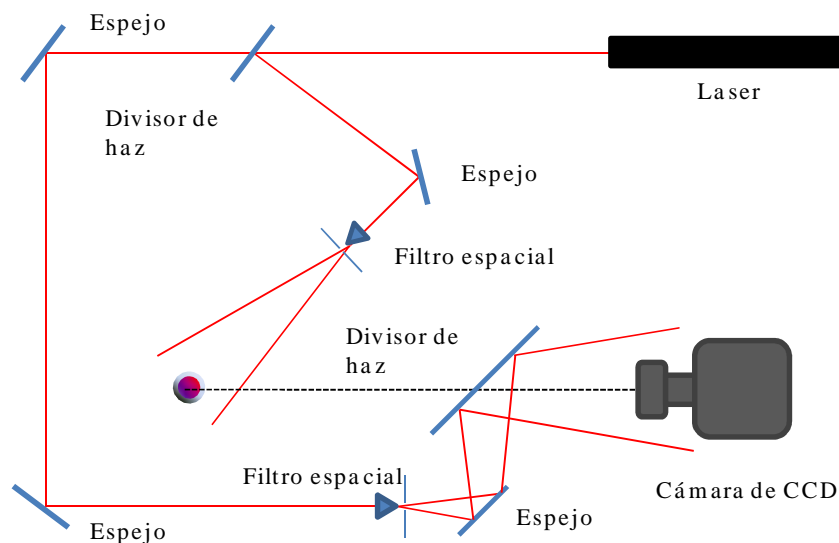


Figura 2- 30. Esquema de holograma en línea de Gabor, de haz dividido.

1.9.3. Modificación de holograma en línea de Gabor.

Una alternativa al holograma en línea de Gabor de haz dividido mostrado en la figura 2-30, es el de haz sobrepuesto. En este el haz de referencia y el haz del objeto parten del mismo plano vertical pero en diferentes planos horizontales, presentando el haz de referencia un ángulo de inclinación pequeño respecto de la horizontal.

En la figura 2-31 se muestra un esquema de este tipo, el cual fue desarrollado con el fin de eliminar el

Uso del divisor de haz entre el objeto y la cámara. Esta modificación presenta la ventaja de permitir regular independientemente y en forma directo la intensidad de cada una de las fuentes de luz. Además, se evita la formación de patrones de interferencia sobre el divisor de haz que pudieran convertirse en una imagen no deseada.

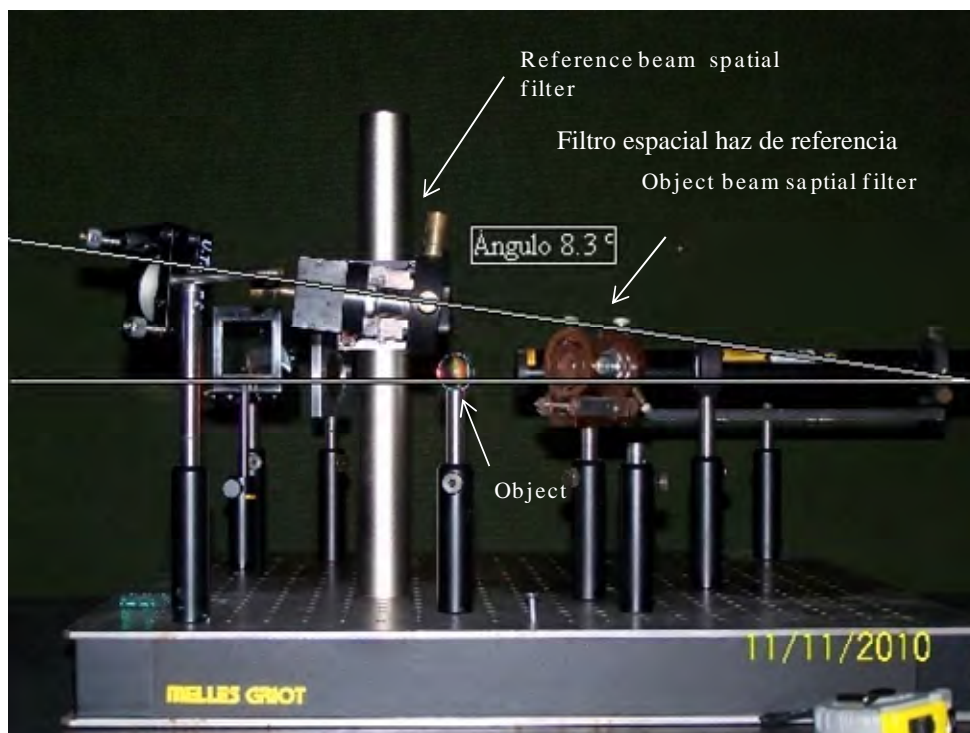


Figura 2- 31. Fotografía del montaje de un esquema de Gabor de haz sobrepuesto, el ángulo seleccionado es de 8,3° lo que minimiza la diferencia de caminos ópticos.

Sin embargo, la principal ventaja radica en la posibilidad de ubicar el objeto en el mismo plano que el filtro espacial del haz de referencia. De esta forma, la igualdad en la divergencia de los frentes de onda, requerida por la ecuación 10, queda garantizada.

1.9.4. Diseño del sistema óptico.

Si bien la técnica elegida resulta mucho más simple de ser implementada que la de haz dividido presenta como principal inconveniente una muy baja selectividad espacial, además de la coexistencia de la imagen virtual y real sobre un mismo plano [Schnars, 2005].

Una frecuencia espacial muy elevada implica un detrimento en el contraste de la imagen reconstruida, pudiendo incluso perderse la posibilidad de lograr el holograma. La frecuencia espacial queda definida por las características del CCD:

$$f_{max} = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta_{max}}{2}$$

Ec. 2-33

$$\theta_{max} \approx \frac{\lambda}{2\Delta x}$$

Donde θ_{max} es el ángulo existente entre el haz del objeto y el haz de referencia y Δx el tamaño del CCD.

Para el montaje óptico del esquema es siempre necesario realizar el cálculo de la distancia mínima entre el objeto y la cámara. Este parámetro resulta de vital importancia ya que de él depende, junto con la capacidad del CCD y el tamaño del píxel, la posibilidad de registrar el patrón de interferencia resultante de la superposición de ambos frentes de onda.

La ecuación [Schnars, 2005] que define esta distancia depende de

$$d_{min} = \sqrt{5} \frac{\Delta x(L + N\Delta x)}{\lambda} \approx \sqrt{2} \frac{\Delta x}{\lambda} \quad \text{Ec. 2-34}$$

Donde Δx es el tamaño de cada elemento del CCD y L el tamaño lateral del objeto.

Si suponemos un objeto de dimensiones reducidas (2 cm x 2 cm), tal como un dado, sería necesaria una distancia de al menos 50 cm entre este y la cámara de CCD cuando se usa una cámara de 1 Mpx.

Si los valores de frecuencia máxima o de distancia no se respetan la imagen resultante se asemeja a una fotografía fuera de foco.

En adelante, para la realización de hologramas digitales se utilizarán tres tipos diferentes de cámara, todas del mismo fabricante Motic Inc., con sensores de tipo CMOS. La definición de las cámaras varía entre 1, 3 y 5 Mpx.

El cálculo realizado precedentemente fija las condiciones para el uso de la cámara de menor definición, siendo esta la peor condición. Así, dependiendo de la cámara y del tamaño del objeto, las distancias de trabajo se encontrarán entre los 20 y los 50 cm.

En la práctica la distancia se varía buscando la mejor posición, definiendo esta como la posición en la cual se consigue el mejor contraste sumado al mayor aumento lateral de la imagen.

2. La Interferometría Holográfica.

La interferometría holográfica es una consecuencia natural de la holografía. Con esta, se ha querido utilizar a los hologramas como un método de ensayo no destructivo. Si bien los interferómetros son conocidos desde mucho tiempo atrás (Michelson, Young, etc.), la holografía interferométrica abre todo un espectro de aplicaciones que habían sido relegadas. El funcionamiento de los interferómetros se basa en la comparación de frentes de onda planos o esféricos separados por una diferencia de fase relativamente pequeña, pero presente en todo el frente de onda. Esto permite que puedan ser usados, muy precisamente, para todo un rango de aplicaciones. Sin embargo, requiere de condiciones de estabilidad y elementos ópticos de muy altas prestaciones. La interferometría holográfica, por el contrario, compara dos patrones de interferencia generados en dos condiciones diferentes, separados en tiempo y espacio afectando todo el frente de onda. Por esto, ya no solo es posible obtener información cuantitativa del fenómeno bajo estudio, si no también información cualitativa del proceso [Caufield, 1979]. A partir de estos principios, una gran cantidad de aplicaciones han sido desarrolladas en los últimos años.

La HI (holografía interferométrica) es un método que permite medir variaciones en los caminos ópticos debidos a cambios en las dimensiones de un cuerpo (opacos) o bien cambios de índice de refracción (translucidos). Por otra parte, es un método que no necesita de un contacto físico con el objeto bajo estudio y dado su alto grado de sensibilidad (es posible discriminar deformaciones de hasta $\frac{1}{2}$ de longitud de onda), existiendo a su vez la posibilidad de implementarlo fuera del laboratorio como lo demuestran los trabajos V. Tornari et al., en los cuales es utilizada como técnica de estudio del estado de conservación de frescos y muros de interés patrimonial.

Una clasificación rápida de los ensayos por IH podría definirse como:

Holografía interferométrica $\left\{ \begin{array}{l} \text{De doble exposición.} \\ \text{De tiempo real.} \end{array} \right.$

Siendo la más difundida la primera de ellas, debido principalmente a su menor complejidad. Sin embargo con el desarrollo de la holografía digital, los ensayos de HID en tiempo real son totalmente factibles y con igual grado de simplicidad.

En la holografía de doble exposición el haz del objeto presenta dos estados: inicial y final. Registrados independientemente en dos hologramas diferentes sobre una misma placa. Para que esto pueda realizarse, debe mantenerse siempre un mismo haz de referencia.

Luego de realizado el revelado de la película el holograma es reconstruido mediante la iluminación con el haz de referencia, el resultado es la imagen del cuerpo sobre el cual, en un plano diferente (plano de la película), se ven superpuestas una sucesión de franjas claras y oscuras (como en cualquier interferómetro) que aportan información respecto de la magnitud y el sentido en la cual se produce.

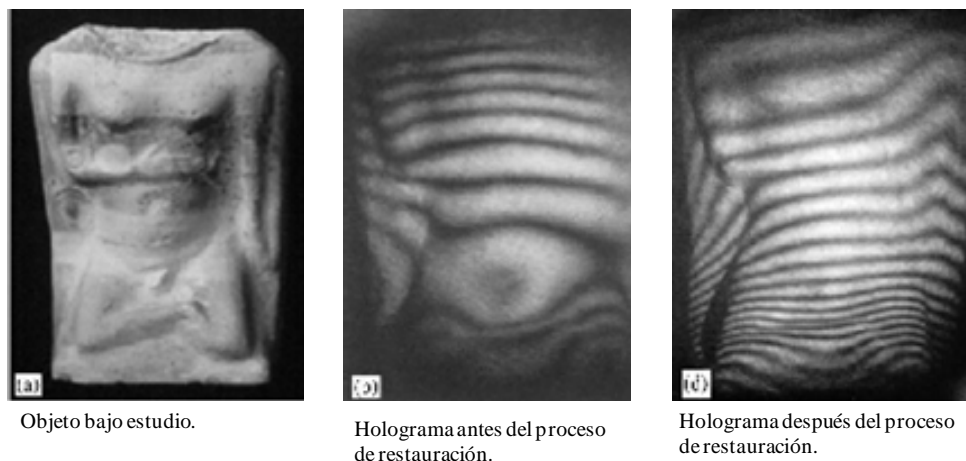


Figura 2- 32. Secuencias de HI usados para la caracterización de un proceso de restauración de una estatua greco-romana, (V. Tornari, 2007).

La técnica en tiempo real se diferencia de la doble exposición en el hecho que la placa holográfica (no es posible usar películas) luego de la primera exposición es procesada químicamente y posteriormente reubicada en la misma posición en la que se encontraba inicialmente. Se debe tener en cuenta que el posicionamiento debe ser exacto y con una diferencia inferior a media longitud de onda. Para evitar este problema, existen diferentes alternativas tales como el procesamiento o revelado in situ propuesto por Van Deelen en 1969 [Van Deelen, 1969] o bien el uso de materiales termoplásticos que no necesitan procesamiento alguno.

Una vez posicionada nuevamente la placa holográfica e iluminada con el haz de referencia, se observará la imagen del objeto perfectamente superpuesta al objeto. Si se introduce una deformación en el objeto (variación térmica, mecánica, acústica etc.), una sucesión de franjas claras y oscuras en permanente cambio podrán ser observadas.

La holografía en tiempo real, a diferencia de la de doble exposición, aporta información del proceso de cambio. Información que se pierde en la técnica de doble exposición en la cual solo es posible registrar el estado inicial y final.

El planteo matemático que a continuación presentaremos es válido tanto para las técnicas de doble exposición como para la de tiempo real.

La amplitud compleja del frente de onda del objeto puede ser representada por:

$$o_1(x, y) = |o(x, y)|e^{-i\varphi(x, y)}$$

Donde $o(x,y)$ es la amplitud y $\phi(x,y)$ la fase del haz reflejado por el objeto. El cambio en el camino óptico producido por un cambio en las dimensiones del objeto debe ser entendido como un corrimiento en la fase de la onda de tal manera que en la segunda condición nos encontramos con una fase $\phi(x,y) + \Delta\phi(x,y)$. Esta diferencia en la fase es llamada fase de interferencia.

$$o_2(x,y) = |o(x,y)|e^{-i\phi(x,y) + \Delta\phi(x,y)}$$

La intensidad del patrón holográfico de interferencia (HI) es descripto por el cuadrado de la suma de las amplitudes complejas, tal como se indica a continuación:

$$I = |o_1 + o_2|^2 = (o_1 + o_2) \cdot (o_1 + o_2)^*$$

$$I = 2 \cdot o^2 \cdot (1 + \cos(\Delta\phi))$$

Ec. 2-35

En la práctica el patrón resultante se ve afectado por varios efectos negativos, tales como:

- El perfil gaussiano del láser es usado para la iluminación de la superficie del cuerpo, por lo que la intensidad resultante de la onda reflejada por el objeto no es constante.
- El patrón de interferencia resultante o interferograma, se ve afectado por el ruido de alta frecuencia espacial del speckle.
- Partículas de polvo o problemas de procesamiento del holograma, generan patrones de difracción indeseados.
- La superficie del objeto bajo estudio presenta diferentes índices de reflexión, influyendo sobre el brillo y el contraste del interferograma.

La ecuación 35 describe la relación entre la intensidad del patrón de interferencia y el cambio de fase que representa. Contiene además, la información acerca de la magnitud física que quiere se mida (desplazamiento del objeto, cambio en el índice de refracción, cambio de volumen etc.). En general no es posible calcular en forma directa el $\Delta\phi$ a partir de los cambios de intensidad medida dado que la función coseno es una función par, derivando en una indeterminación del signo (30° o -30° es lo mismo en el resultado final de la función coseno).

Otro aspecto interesante de la HI es la información contenida en la distribución y topología de las franjas ya que estas aportan información adicional respecto del cambio en las dimensiones del objeto. Dos situaciones muy diferentes se plantean; si por ejemplo consideramos un fenómeno de dilatación térmica respecto de una deformación lineal por tracción. En la primera existirá una deformación volumétrica donde en función de las dimensiones del objeto prevalecerá o no una dimensión. Mientras que en la segunda, es conocido el sentido de la deformación y por lo tanto carece de interés la distribución de las franjas, salvo que existan fracturas o un material sumamente heterogéneo.

2.1 Localización de las franjas.

La observación de un HI presenta una multiplicidad de ambigüedades que deben ser resueltas, entre estas se destaca el hecho que en función del ángulo de observación del holograma la forma y distribución de estas cambian. También lo hacen en intensidad existiendo una dirección particular para la cual la visibilidad de las franjas es máxima. Esta posición es denominada plano de localización de las franjas. Otro aspecto particular es que las franjas y la imagen parecen ubicarse en diferentes planos focales, problema que se denota cuando es usada una cámara de foco variable

para obtener una imagen del interferograma. Múltiples trabajos han intentado aclarar estas ambigüedades [Hariharan, 1996], existiendo hasta el día de hoy aspectos no resueltos respecto de tema. Uno en particular, es la pérdida de selectividad espacial que se produce cuando la deformación es introducida mediante variación térmica del objeto.

El denominado Holodiagrama de Abramson [Abramson, 1969] representa en una forma geométrica simple la localización de las franjas y sus variaciones en función del esquema.

Así, dependiendo de del tipo de deformación se podrían ubicar las franjas en el infinito cuando la traslación es pura en z (dirección perpendicular al plano del objeto) o sobre el objeto cuando se trata de una rotación pura respecto del eje z . Entre medio existen un sin número de posibilidades.

2.2 Mediciones de desplazamientos mediante HI.

Es evidente que al producirse una deformación en el cuerpo, existirá una diferencia de camino óptico en la trayectoria del haz de referencia, tal como lo establece la ecuación 35. Debemos por lo tanto encontrar la forma de relacionar la magnitud del desplazamiento con la diferencia de fase registrada. En la figura 2-33 se muestra un esquema que sirve de base para encontrar dicha relación.

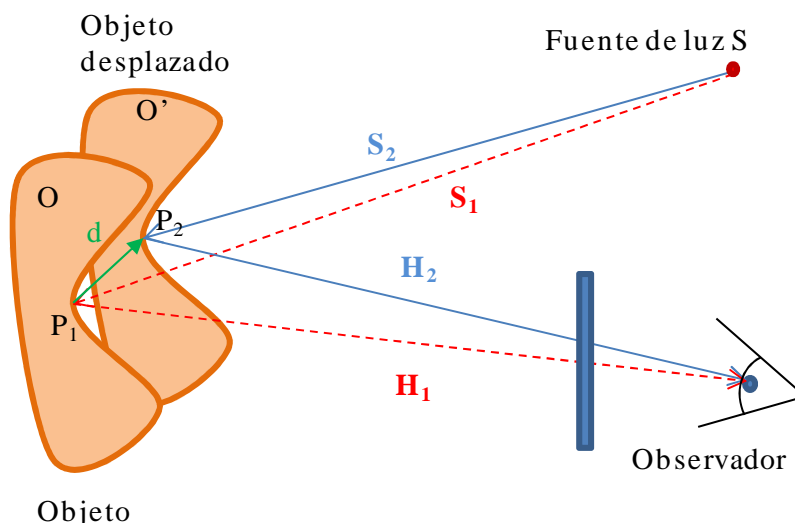


Figura 2- 33. Esquema que representa la diferencia de caminos ópticos, debido a un desplazamiento del objeto bajo estudio.

Si consideramos un HI de doble exposición donde el cuerpo se encontraba en las coordenadas $o(x,y,z)$ durante la primera exposición y en las coordenadas $o'(x',y',z')$ durante la segunda exposición, es evidente que podemos trazar un vector que defina el desplazamiento de cualquiera de los puntos que forman el objeto. En este caso, lo hemos designado con la letra d y lo denominaremos vector de desplazamiento. Este da una medida del desplazamiento o deformación registrada por el objeto de la posición inicial P_2 a la posición final P_1 . Por otra parte, designaremos a $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{H}_1$ y \vec{H}_2 como vectores unitarios correspondientes con las direcciones de iluminación del objeto y observación del holograma.

A partir de estos vectores de trayectoria podemos encontrar una expresión matemática que nos cuantifique la diferencia de camino óptico.

$$\delta = \overline{SP_1} + \overline{P_1B} - (\overline{SP_2} + \overline{P_2B})$$

Ec. 2-36

$$\delta = \vec{S}_1(\overline{SP_1}) + \vec{H}_1(\overline{P_1B}) - \vec{S}_2(\overline{SP_2}) - \vec{H}_2(\overline{P_2B})$$

Del esquema de la figura 2-18, relacionándolo con la práctica real de la holografía, debemos considerar que las distancias de la fuente al objeto o de la imagen al observador se encuentran en el rango de los centímetros, mientras que la magnitud del vector desplazamiento se encuentra en el orden de los micrómetros. Así cabe lugar la realización de aproximaciones en la cuales los vectores \vec{S}_1 y \vec{S}_2 pueden ser reemplazados por un nuevo vector \vec{S} y los vectores \vec{H}_1 y \vec{H}_2 por un nuevo vector \vec{H} , ambos ubicados en el punto medio, definidos por la bisectrices de los ángulos, formados por estas trayectorias. Bajo estas condiciones el vector de desplazamiento puede ser definido matemáticamente como:

$$\vec{d} = \vec{P_1B} - \vec{P_2B}$$

$$\vec{d} = \vec{SP_2} - \vec{SP_1}$$

Que reemplazando resulta;

$$\delta = (\vec{H} - \vec{S})\vec{d} \quad \text{Ec. 2-37}$$

Aplicando la ecuación 5:

Resulta:

$$\Delta\varphi(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{H} - \vec{S})\vec{d}(x, y, z) = \vec{d}(x, y, z)\vec{S} \quad \text{Ec. 2-38}$$

Donde el vector \vec{S} recibe el nombre de vector de sensibilidad y representa la dirección de observación donde se determina la máxima sensibilidad. Este es definido por la geometría del esquema utilizado, en particular los ángulos de incidencia y del objeto. Así, la proyección del vector de desplazamiento sobre el vector sensibilidad es determinado por la ecuación 38, constituyéndose como la condición a partir de la cual es posible realizar todas las mediciones cuantitativas de la deformación del objeto.

En el caso general en el cual existe una deformación volumétrica del objeto, la ecuación 36 presenta el inconveniente que las tres componentes de \vec{d} son desconocidas. Para poder definir las, se deben tomar tres interferogramas del mismo objeto con tres direcciones independientes del vector sensibilidad. Prácticamente, se utilizan tres direcciones diferentes del haz de referencia.

Un caso particular y de gran aplicación práctica es el de la denominada deformación pura en z, en esta solamente se considera el desplazamiento del objeto en la dirección perpendicular al plano definido por el frente del mismo. La mejor condición de evaluación queda definida por una dirección de observación e iluminación paralelas en cuyo caso;

$$\vec{S} = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{H} - \vec{S}) = \frac{2\pi}{\lambda} (0,0,2)$$

Resultando que:

$$d(z) = \Delta\varphi \frac{\lambda}{4\pi} \quad \text{Ec. 2-39}$$

Por lo cual para una variación de 2π corresponde una deformación de $\lambda/2$. Si observamos un holograma en esta condición cada vez que pasamos de una franja clara a una oscura existe una variación de fase de π y por lo tanto corresponde a una deformación o desplazamiento de un cuarto de longitud de onda, así si contamos el número de franjas claras u oscura y les damos el valor n, la deformación total del objeto quedará definida por:

$$d(z) = n \frac{\lambda}{4} \quad \text{Ec. 2-40}$$

Desarrollo de modelos matemáticos para la determinación del vector desplazamiento.

Del estudio de la bibliografía realizado para entender la posición de las franjas en un holograma, como así también para la determinación de la magnitud del vector desplazamiento queda definida la necesidad de avanzar sobre el desarrollo de modelos matemáticos que nos permitan: cuantificar las deformaciones y simular mediante algoritmos computacionales la distribución de las franjas.

Como ejemplo de esto, consideremos la imagen mostrada en la figura 2-34, la cual corresponde a una probeta metálica de acero ANSI 304 de 50 mm de altura por 10 mm de espesor y 170 mm de longitud. La misma, no ha recibido ningún tipo de tratamiento térmico superficial. Esta, fue sometida a un incremento térmico de 20°C a 100°C en horno durante un período de 24 h. Evidentemente estamos en presencia de un ensayo por dilatación térmica, por lo cual debería esperarse una deformación volumétrica.

De la observación directa de la imagen resultante podemos notar la presencia de deformaciones localizadas, las cuales es posible identificar a partir la comparación de las franjas documentadas en la bibliografía de referencia [Hariharan, 1996] [Schnars, 2005] [Hossain, 2007] y correspondientes a deformaciones puras en z . En la figura 2-34 se indican mediante las letras A, B, C y D.

Por otra parte es posible seguir la trayectoria de franjas que indican zonas de igual nivel de deformación o fase constante en el resto de la superficie.

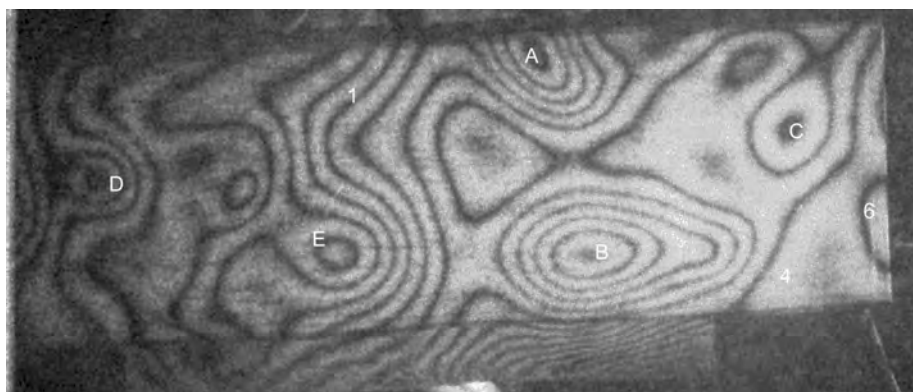


Figura 2- 34. ITH 5-2007. Imagen holográfica de la probeta y del patrón de HI resultante, para un $\Delta T = 1.5^\circ\text{C}$.

Es evidente que un patrón resultante de este tipo, contempla un nivel de información importante respecto del comportamiento de la probeta pero que resulta de difícil cuantificación.

Un análisis cualitativo nos estaría indicando que existen zonas en las cuales el comportamiento encontrado no se condice con el esperado en una probeta homogénea. Las deformaciones puras en z encontradas estarían indicando la presencia de tensiones residuales o bien la presencia de inclusiones no metálicas en el material (con un coeficiente de dilatación diferente).

El concepto de vector de desplazamiento resulta, en este caso, de muy difícil aplicación de acuerdo con el planteo antes presentado.

2.3.1. Desplazamiento puro en z .

Para nuestro análisis consideremos un esquema en el cual la trayectoria recorrida por el haz del objeto, desde su fuente (filtro espacial) sigue una trayectoria S y desde el objeto a la película holográfica, una trayectoria H. Durante la observación la imagen se ubicará aproximadamente en la misma posición que el objeto ocupaba durante la construcción del holograma. El haz de referencia debe poseer la misma dirección tanto durante la realización como durante la observación. El planteo es similar al realizado en el punto 2.2. Pero a diferencia de este, agregaremos los ángulos de incidencia y de observación como elementos a tener en cuenta. Estos se encuentran formados por la dirección del vector de incidencia y del vector observación con respecto de la recta normal al plano imaginario, tangente a la superficie del objeto (figura 2-23).

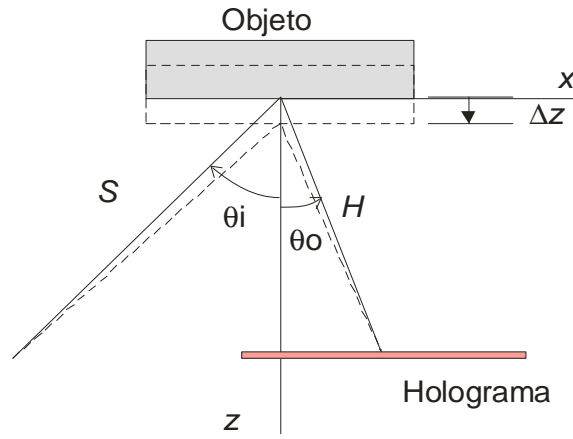


Figura 2- 35. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en la dirección pura en z.

Como se observa en la figura, existen dos posiciones del objeto en función de su estado (deformación). El desplazamiento queda indicado como ΔZ y afectará tanto las trayectorias como los ángulos.

Matemáticamente y basándonos en relaciones trigonométricas podemos encontrar la longitud total de la trayectoria.

Antes de ser considerada la deformación, la trayectoria total puede ser considerada como la suma de las trayectorias individuales:

$$d = S + H$$

Introducida la deformación o corrimiento del objeto:

$$d' = \sqrt{(S \sin \theta_i)^2 + (S \cos \theta_i - \Delta z)^2} + \sqrt{(H \sin \theta_o)^2 + (S \cos \theta_o - \Delta z)^2} \quad \text{Ec. 2- 41}$$

Tal como lo indicamos en la ecuación 37 la diferencia de caminos queda expresada por la resta de ambas trayectorias, así:

$$\Delta d = d' - d$$

$$\Delta d = S \left[\sqrt{1 - 2 \left(\frac{\Delta z}{S} \right) \cos \theta_i + \left(\frac{\Delta z}{S} \right)^2} - 1 \right] + H \left[\sqrt{1 - 2 \left(\frac{\Delta z}{H} \right) \cos \theta_o + \left(\frac{\Delta z}{H} \right)^2} - 1 \right] \quad \text{Ec. 2-42}$$

Ecuación que puede ser llevada a una aproximación de primer orden, dando como resultado:

$$\Delta d \approx S \left[1 - \frac{1}{2} \left(2 \frac{\Delta z}{S} \right) \cos \theta_i - 1 \right] + H \left[1 - \frac{1}{2} \left(2 \frac{\Delta z}{H} \right) \cos \theta_o - 1 \right] = -\Delta z (\cos \theta_i + \cos \theta_o) \quad \text{Ec. 2-43}$$

Un caso particular de análisis es aquel en que ambos ángulos son iguales, resultando:

$$\Delta d = -2\Delta z (\cos \theta_i) \quad \text{Ec. 2-44}$$

La diferencia de fase la podemos obtener a partir de la ecuación 5;

$$\Delta \phi = -\Delta z \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_i + \cos \theta_o)$$

De esta última ecuación es posible definir que dependiendo del ángulo de observación o de incidencia la diferencia de fase será variable para una misma magnitud de deformación. En otras palabras la cantidad de franjas claras y oscuras que se verán sobre el cuerpo dependerá de la ubicación de las trayectorias de incidencia y de observación. Por otra parte si tanto el ángulo de incidencia y el de observación son cero entonces se cumple la ecuación 37. Si en cambio mantenemos constante el ángulo de incidencia pero variamos el ángulo de observación la diferencia de fase se verá afectada en magnitud dado que el coseno variaría de -1 a 1. Si igualamos los caminos ópticos y geométricos, entonces resulta que:

$$\Delta\phi \cong -2\pi n(\cos\theta_i + \cos\theta_o)$$

Donde n es el número de franjas claras u oscuras que se ven sobre la imagen.

Para cuantificar la magnitud de la deformación, resulta:

$$\Delta z = \frac{-\Delta\phi\lambda}{2\pi(\cos\theta_i + \cos\theta_o)}$$

Ec. 2-45

$$\Delta z = -\frac{n\lambda}{(\cos\theta_i + \cos\theta_o)}$$

Esta última ecuación presenta además una particularidad, si hacemos variable el ángulo de observación cambiando la posición del observador, la magnitud Δz debería cambiar en forma inversa situación que no es posible dado que esta magnitud es introducida físicamente y por lo tanto debe mantener un valor constante. Así la única posibilidad es que el valor de n varíe proporcionalmente.

En el holograma esta situación se vería como un aumento o disminución en el número de franjas, dependiendo del sentido del movimiento.

2.3.2. Desplazamiento puro en x.

Para obtener las ecuaciones que representan el desplazamiento puro en x, operaremos bajo las mismas condiciones que lo hicimos para el análisis en z.

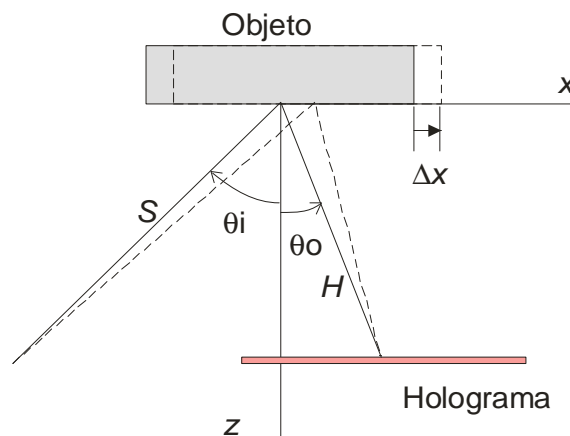


Figura 2- 36. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en la dirección pura en x.

Antes de ser introducida la deformación la trayectoria total puede ser considerada como la suma de las trayectorias individuales:

$$l = S + H$$

Introducida la deformación o corrimiento del objeto:

$$l' = \sqrt{(S \sin \theta_i + \Delta x)^2 + (S \cos \theta_i)^2} + \sqrt{(H \sin \theta_o - \Delta x)^2 + (H \cos \theta_o)^2}$$

La diferencia de caminos queda expresada por la resta de ambas trayectorias, así:

$$\Delta l = l' - l$$

$$\Delta l = S \left[\sqrt{1 + 2 \left(\frac{\Delta x}{S} \right) \sin \theta_i + \left(\frac{\Delta x}{S} \right)^2} - 1 \right] + H \left[\sqrt{1 - 2 \left(\frac{\Delta x}{H} \right) \sin \theta_o + \left(\frac{\Delta x}{H} \right)^2} - 1 \right]$$

La cual puede ser reducida mediante una aproximación de primer orden:

$$\Delta l \approx S \left[1 - \frac{1}{2} \left(2 \frac{\Delta x}{S} \right) \sin \theta_i - 1 \right] + H \left[1 - \frac{1}{2} \left(2 \frac{\Delta x}{H} \right) \sin \theta_o - 1 \right] = \Delta x (\sin \theta_i - \sin \theta_o) \quad \text{Ec. 2- 46}$$

La diferencia de fase la podemos obtener a partir de la ecuación 5;

$$\Delta \phi = \Delta x \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta_i - \sin \theta_o) \quad \text{Ec. 2-47}$$

De donde;

$$\Delta x = \frac{\Delta \phi \lambda}{2\pi (\sin \theta_i - \sin \theta_o)} \quad \text{Ec. 2-48}$$

$$\Delta x = \frac{n\lambda}{(\sin \theta_i + \sin \theta_o)}$$

Evidentemente las observaciones hechas para las deformaciones puras en z son también aplicables a las deformaciones en x.

2.3.3. Desplazamiento puro en y.

Para obtener las ecuaciones que representan el desplazamiento puro en y, operaremos bajo las mismas condiciones que lo hicimos para el análisis en z y en x.

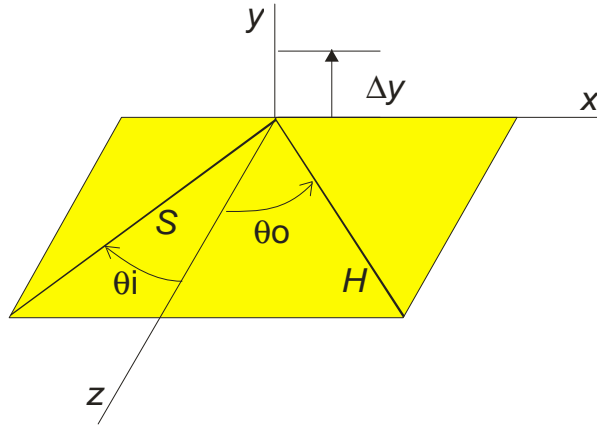


Figura 2- 37. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en la dirección pura en y.

Antes de ser introducida la deformación la trayectoria total puede ser considerada como la suma de las trayectorias individuales:

$$l = S + H$$

Introducida la deformación o corrimiento del objeto:

$$l' = \sqrt{S^2 + \Delta y^2} + \sqrt{H^2 + \Delta y^2}$$

La diferencia de caminos queda expresada por la resta de ambas trayectorias, así:

$$\Delta l = l' - l$$

$$\Delta l = S \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{S}\right)^2} - 1 \right] + H \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta y}{H}\right)^2} - 1 \right]$$

La cual puede ser reducida mediante una aproximación de segundo orden:

$$\Delta l \approx S \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta y}{S}\right)^2 \right] + H \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta y}{H}\right)^2 \right] \quad \text{Ec. 2-49}$$

La diferencia de fase la podemos obtener a partir de la ecuación 5.

$$\Delta \phi = \Delta y^2 \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{H} \right) \quad \text{Ec. 2-50}$$

De donde;

$$\Delta y = \sqrt{\frac{\Delta \phi \lambda S H}{\pi (S + H)}} \quad \text{Ec. 2-51}$$

$$\Delta y = \sqrt{2n\lambda \frac{SH}{(S+H)}}$$

Es evidente que la deformación en y se encuentra en un rango de magnitud diferente a la de x o z , siendo totalmente independiente de los ángulos de observación e incidencia.

2.3.4. Desplazamiento combinado en tres dimensiones.

De la misma manera en la que hemos operado, planteamos el desplazamiento tridimensional. Antes de ser introducida la deformación la trayectoria total puede ser considerada como la suma de las trayectorias individuales:

$$l = S + H$$

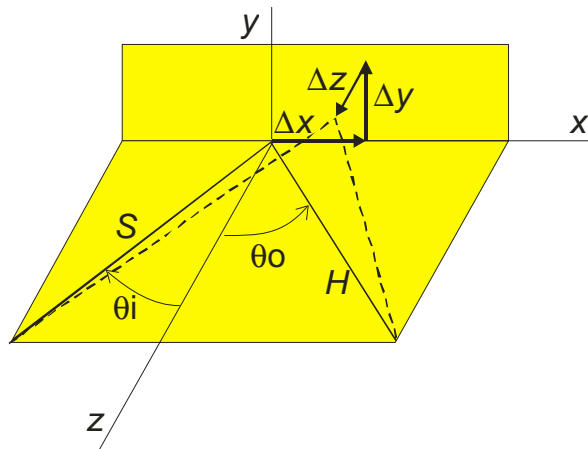


Figura 2- 38. Esquema para el análisis de la distribución cuantitativa de las franjas en tres dimensiones.

Introducida la deformación o corrimiento del objeto:

$$l' = \sqrt{(S \sin \theta_i + \Delta x)^2 + \Delta y^2 + (S \cos \theta_i - \Delta z)^2} + \sqrt{(H \sin \theta_o - \Delta x)^2 + \Delta y^2 + (S \cos \theta_o - \Delta z)^2}$$

La diferencia de caminos queda expresada por la resta de ambas trayectorias, así:

$$\Delta d = d' - d$$

$$\Delta l = S \left[\sqrt{1 + 2 \left(\frac{\Delta x \sin \theta_i - \Delta z \cos \theta_i}{S} \right) + \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{S^2}} - 1 \right] + H \left[\sqrt{1 - 2 \left(\frac{\Delta x \sin \theta_o - \Delta z \cos \theta_o}{H} \right) + \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{H^2}} - 1 \right]$$

La cual puede ser reducida mediante una aproximación de segundo orden:

$$\Delta l \approx \Delta x (\sin \theta_i - \sin \theta_o) + 0 \Delta y - (\cos \theta_i + \cos \theta_o) \Delta z + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\cos^2 \theta_i}{S} + \frac{\cos^2 \theta_o}{H} \right) \Delta x^2 + \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{H} \right) \Delta y^2 + \left(\frac{\sin^2 \theta_i}{S} + \frac{\sin^2 \theta_o}{H} \right) \Delta z^2 + \left(\frac{\sin \theta_i \cos \theta_i}{S} - \frac{\cos \theta_o \sin \theta_o}{H} \right) \Delta x \Delta z \right]$$

Ec. 2-52

La diferencia de fase la podemos obtener a partir de la ecuación 5;

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \Delta x (\sin \theta_i - \sin \theta_o) + 0 \Delta - (\cos \theta_i + \cos \theta_o) \Delta z + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\cos^2 \theta_i}{S} + \frac{\cos^2 \theta_o}{H} \right) \Delta x^2 + \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{H} \right) \Delta y^2 + \left(\frac{\sin^2 \theta_i}{S} + \frac{\sin^2 \theta_o}{H} \right) \Delta z^2 + \left(\frac{\sin \theta_i \cos \theta_i}{S} - \frac{\cos \theta_o \sin \theta_o}{H} \right) \Delta x \Delta z \right] \right\}$$

Ec. 2-53

De donde vemos que la distribución de franjas cuando la deformación es volumétrica puede resultar sumamente compleja, siendo prácticamente imposible encontrar las deformaciones en forma individual. En estos casos es donde las técnicas de las técnicas de corrimiento de fase son necesarias.

Sin embargo, se puede apreciar en la ecuación 53 que para obtener una misma diferencia de fase, las deformaciones en cada una de las dimensiones deben ser diferentes, siendo la más sensible la deformación en z. Así para el caso de la figura 2-34 donde el intervalo de temperatura era de tan solo 1,5 °C las franjas predominantes son las de deformación en z.

2.4. Principios generales de la holografía interferométrica digital.

En la HID (Holografía Interferométrica Digital), las condiciones de obtención son sustancialmente diferentes a las de la holografía convencional. En esta cada imagen es obtenida electrónicamente y posteriormente procesada. Durante el procesamiento es posible separar la modulación de amplitud y la de fase, con el fin de reconstruirlas separadamente.

La fase relativa, correspondiente a cada uno de los frentes de onda, provenientes del objeto en cada uno de sus estados, queda definida por el argumento de la imagen reconstruida;

$$\varphi_1(\xi, \eta) = \arctang \frac{\text{Im} I_1(\xi, \eta)}{\text{Re } I_1(\xi, \eta)}$$

$$\varphi_2(\xi, \eta) = \arctang \frac{\text{Im} I_2(\xi, \eta)}{\text{Re } I_2(\xi, \eta)}$$

Ec. 2-54

Como sabemos la función arco tangente, que define el argumento de una función de variable compleja, nos entrega un dominio acotado que van de $-\pi/2$ a $\pi/2$. Cada franja determina un salto a una indeterminación propia de la función en $\pi/2$.

Para poder obtener una definición en la diferencia de fase más allá de los límites de la función, la diferencia de fase resultante de la interferencia de ambos frentes puede ser calculada en forma directa mediante la resta de las fases relativas [Schnars, 2005].

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad \text{cuando } \varphi_1 > \varphi_2$$

Ec. 2- 55

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + 2\pi \quad \text{cuando } \varphi_2 > \varphi_1$$

Así, la reconstrucción del holograma y su posterior evaluación, tal como se mostró anteriormente es totalmente innecesaria, dado que el algoritmo aportará dicha información. Para que esto ocurra, será necesaria la aplicación de un algoritmo de “desenrollamiento o demodulación” de fase, basado en una función que permitiría la obtención de una distribución de fase continua que va desde $-\pi$ a π .

2.4.1. Desenrollamiento, demodulación de la fase o fase demodulada

Todas las funciones trigonométricas inversas presentan saltos de 2π , cuando se las representa en un mapa de diferencias de fase. Independientemente de la deformación sufrida por un objeto, cuando se plantea la reconstrucción por HI, la magnitud de esta deberá ser calculada a partir de la reconstrucción de la fase y por lo tanto quedará acotada entre $-\pi$ y π .

Si consideramos un sistema compuesto por una barra a la cual se le introduce una flexión, las franjas de interferencia que aparecerán sobre el objeto, obedecerán a una distribución como la mostrada en la figura 2-39.

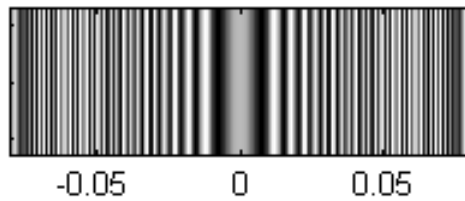


Figura 2- 39. Patrón de interferencia resultante por flexión de una barra.

Si de esta, tomáramos las tres primeras franjas oscuras a cada lado de la franja central, asociando a estas con una interferencia totalmente destructiva, podríamos definir un diagrama de fases lineal en el cual se podrían documentar los saltos de 2π y su indeterminación.

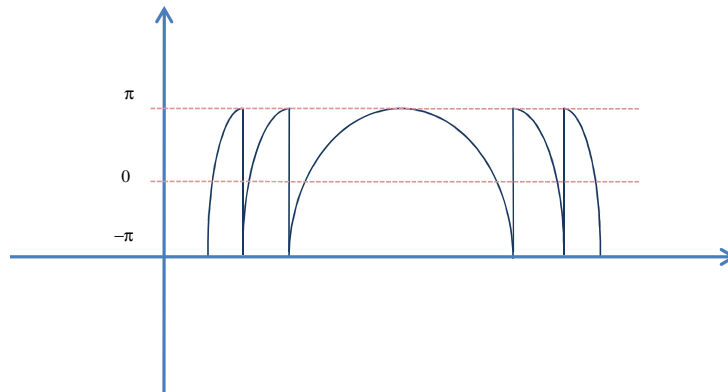
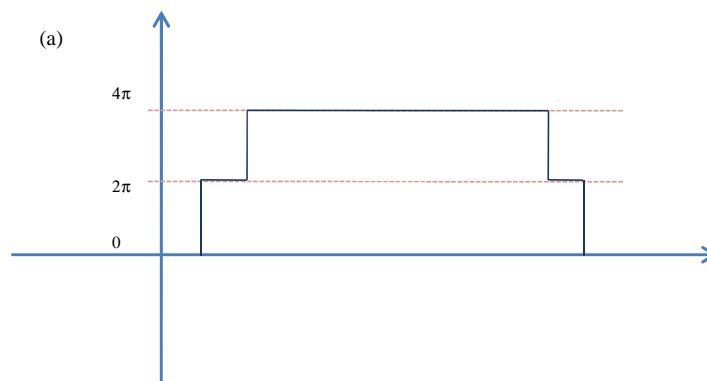


Figura 2- 40. Diagrama de fase lineal correspondiente a la distribución de franjas de la simulación de la figura 2-39.

En este diagrama de fase, quedan representados los saltos de fase de las funciones trigonométricas. Para poder interpretar las franjas de interferencia del holograma debemos obtener una distribución continua de diferencias de fase, en la cual se eviten los saltos. La obtención de esta distribución se conoce como demodulación de la fase o desenrollamiento de la fase. Para lograr esto, han sido desarrollados diferentes tipos de algoritmos, uno particular es el denominado algoritmo de dependiente del paso [Schnars, 2005]. Este se sustenta en la aplicación de las ecuaciones 54 y 55, a partir de las cuales es posible: primero, escalonar los saltos de fase obteniendo una distribución discreta. Segundo, obtener la demodulación de la fase en forma continua. En las gráficas de la figura 2-41, se representa esquemáticamente este proceso.



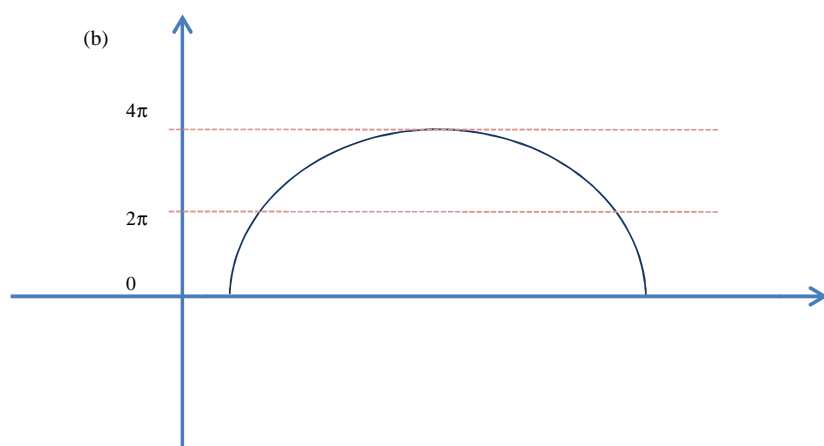


Figura 2- 41. (a)Función de escalonamiento discreto de fase. (b) Demodulación de la fase.

Otros algoritmos, se encuentran disponibles como funciones de Matlab[®], uno de ellos el método “Brunch – Cut” [Ma, 2012], puede ser aplicado en ordenadores de baja capacidad. En la figura 2-42 se muestra el resultado de la obtención de un HID realizado sobre una barra metálica en dilatación, con un ΔT de 3,8°C. La deformación producida sobre la barra es de tipo dilatación volumétrica.

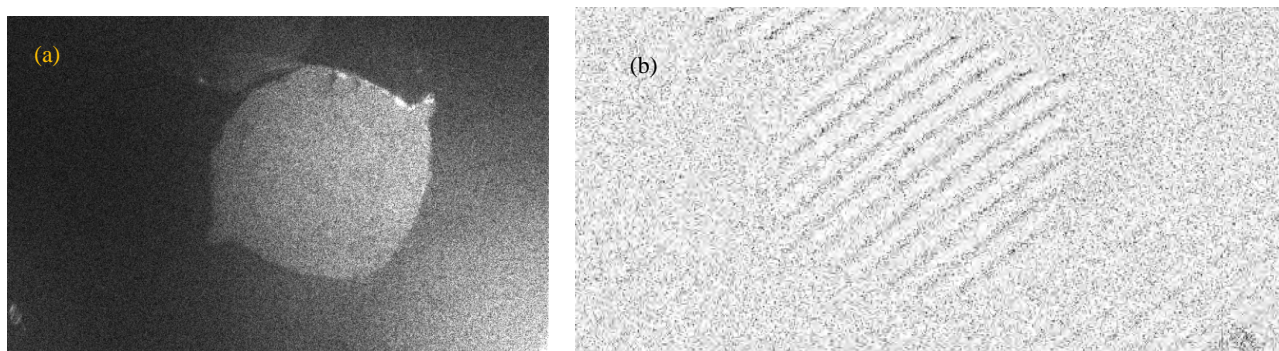


Figura 2- 42. (a) Imagen de holográfica de amplitud del corte transversal de una barra de acero nervado. (b) HID de fase de la misma pieza sin filtrado previo.

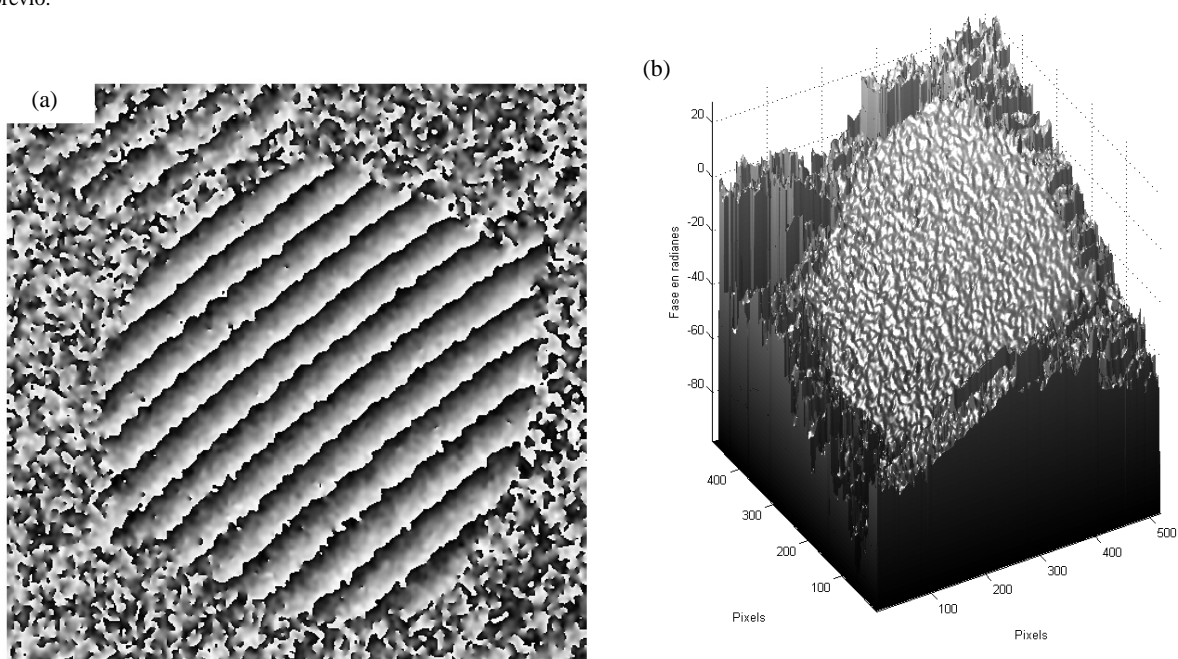


Figura 2- 43. (a) Imagen del HID de fase luego de la aplicación de un filtro seno –coseno con 7 iteraciones. (b) Diagrama de fase demodulada de la misma pieza mediante el método Brunch-Cut [Ma, 2012].

El método Brunch–Cut se basa en el algoritmo de Goldenstein [Li, 2009], algoritmo dependiente del paso. De acuerdo con la bibliografía consultada es aplicado en diferentes áreas del tratamiento digital de imágenes tales como sistemas simétricos de radar interferométricos, imágenes de resonancia magnética, tomografía óptica Doppler, imágenes acústicas interferométricas y por supuesto holografía digital. Su principal característica es su velocidad de procesamiento que permite operar incluso en ordenadores de baja capacidad. Sin embargo, presenta limitaciones cuando el nivel de ruido en el diagrama de fase es elevado. Por otra parte es un algoritmo que presenta discontinuidades ante una variación abrupta de la fase. El algoritmo de Goldenstein fue obtenido de la página de Mathworks:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22504-2d-phase-unwrapping-algorithms/content/GoldsteinUnwrap2D.m>

Modificado y adaptado a la rutina de reconstrucción de hologramas propuesta en la figura 2-44.

Un segundo método de demodulación de fase es el denominado de mínimos normalizados, entre estos se encuentra el método de guiado de calidad [Zhang, 2014]. Este, a diferencia del método Branch cut, genera mapas de fase de mejor definición reduciendo el riesgo de discontinuidad en el mapa de fase demodulada debido a la presencia de singularidades. Básicamente este tipo de algoritmo evalúa el mapa de calidad de la imagen, definiendo una “lista de entorno” a partir de la cual el diagrama es reconstruido píxel a píxel de acuerdo con esta lista. El ruido o las discontinuidades definen valores de baja calidad los cuales son rechazados en la formación del diagrama y solo los de alta calidad son usados. Este método se sustenta sobre diferentes algoritmos tales como: mapas de correlación, variancia de la derivada de fase, máximo gradiente de fase entre otros [Zhang, 2014] [Heshmat, 2013].

Nuevamente el algoritmo usado fue obtenido de la página de Mathworks:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22504-2d-phase-unwrapping-algorithms/content/QualityGuidedUnwrap2D.m>

Adaptado en el programa al desarrollado para la reconstrucción de los HID.

2.4.2. Reconstrucción del holograma interferométrico digital.

Previamente en el punto 1.9 de este capítulo, desarrollamos una somera explicación del mecanismo de construcción y reconstrucción de la imagen en la HD. Como demostramos oportunamente, las condiciones de obtención del patrón de interferencia, se diferencian sustancialmente de las necesarias para la obtención de un holograma convencional. En todos los casos, debido a la baja resolución de la cámara de CCD, es necesario recurrir a esquemas ópticamente acotados. Sin embargo, la HID presenta ventajas comparativas en los que respecta a los tiempos de obtención y realización de ensayos. Así un mismo ensayo interferométrico que en forma fotográfica puede demandar varios días, con HID puede ser concretado en horas.

Otra ventaja importante de la HID respecto de la HI, es la simplicidad del análisis de los patrones de interferencia resultantes. Mientras que en la HI son indispensables una serie de pasos intermedios, en los cuales el operador es un partícipe necesario, en la HID el resultado cuantitativo de cada ensayo puede ser obtenido en forma directa a partir de la capacidad de procesamiento del ordenador.

En la figura 2-29 se muestra el diagrama de flujo para la reconstrucción de la imagen. Luego de la aplicación de las líneas de programa correspondientes a la eliminación del término de continua el diagrama se divide en dos ramas, una para la obtención del holograma de amplitud y la otra para la obtención del holograma de fase. Este programa base es utilizado para la obtención de los HID, introduciendo líneas de programación adicionales.

En todo análisis de HID es conveniente realizar ambas reconstrucciones, dado que la imagen de amplitud es la que nos permitirá definir cuál de las imágenes gemelas es la de primer orden y de tipo real. Por otro lado, la secuencia de reconstrucción del HID debe seguirse la rama que deriva en la reconstrucción del holograma de fase. Con el fin de obtener el HID, es evidente que deberá trabajarse sobre dos imágenes diferentes, tal cual o hacíamos en la HI. Estas imágenes se encuentran separadas por una condición Δ de cambio.

En la figura 2-44 se encuentra representado el diagrama de flujo para el procesamiento del HID.

El resultado final del proceso de reconstrucción de la imagen finaliza en la obtención del holograma de diferencia de fase. En este se encuentra contenida toda la información relacionada con el cambio del objeto luego de haber sido sometido a la condición Δ de cambio. En general esta imagen es de baja definición por lo que pueden aplicarse diferentes tipos de filtro para mejorarla.

Una vez aplicado el filtrado, las franjas son claramente reconocibles. Con una rutina de filtro seno-coseno, la imagen resultante, permite una notable mejora en los saltos de fase, representados por una zona clara y uno oscuro colindantes. En la figura 2-45 puede observarse una imagen comparativa entre la imagen de fase y la imagen filtrada. Nótese que con un filtro de realce de diferencia de fase como lo es el seno-coseno, las franjas se desplazan en intensidad hacia el final de la zona de cambio de fase esperada de la función coseno que rige la distribución de franjas en la imagen reconstruida del HID. Esto representa una ventaja a la hora de identificar claramente el número total de franjas.

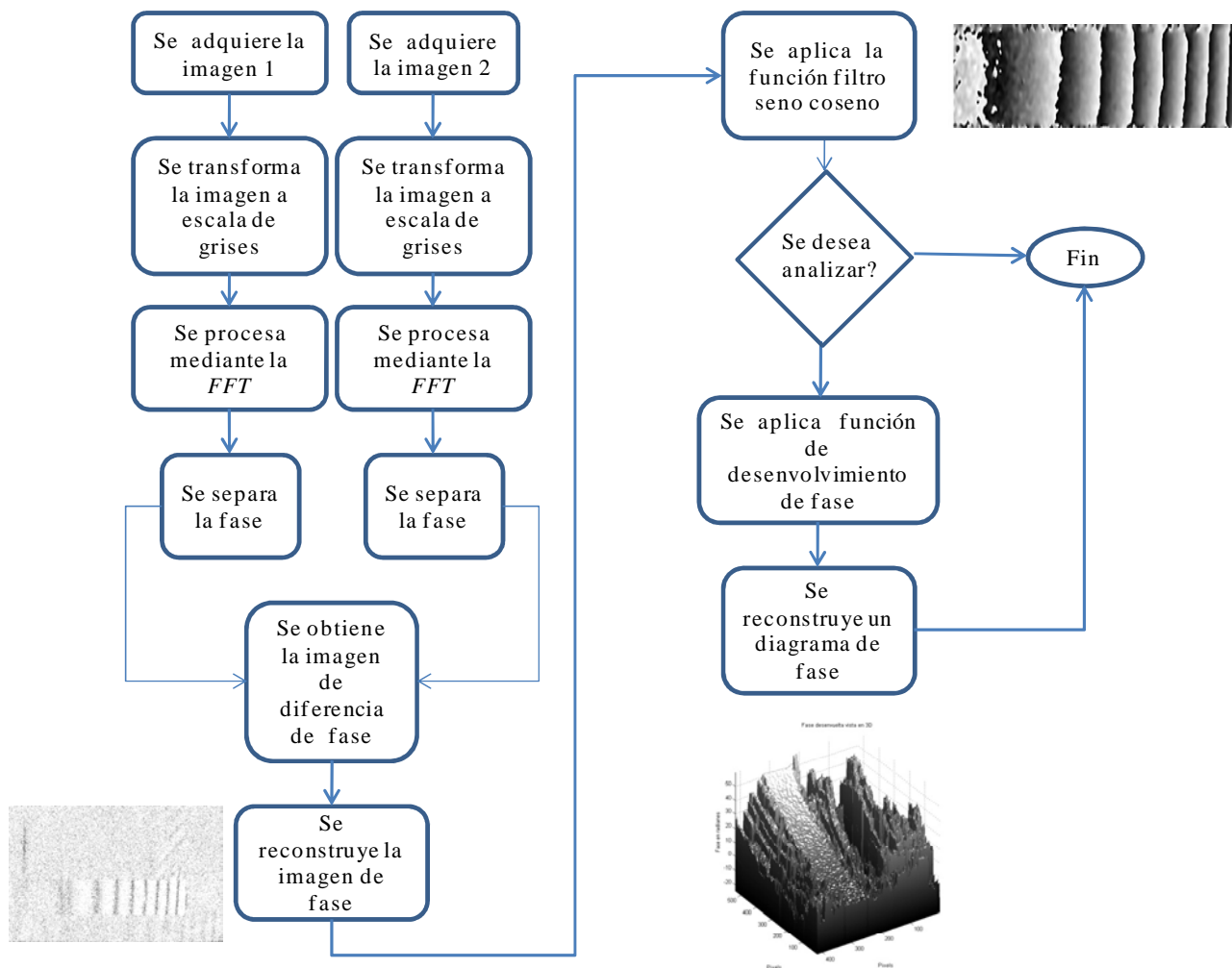


Figura 2- 44. Diagrama de flujo que representa el algoritmo de reconstrucción y análisis del HID.

3. Análisis del holograma interferométrico.

En un HI las franjas resultan maximizadas en cuanto a su definición existiendo un ángulo particular de observación en el cual las franjas presentan un máximo nivel de contraste respecto de la imagen. En la HID el estudio de las franjas es sustancialmente diferente, si bien aportan información cuantitativa y cualitativa existen limitantes que deben considerarse. Entre estos podemos enumerar: un bajo nivel de definición de la imagen reconstruida, un ángulo de observación fijo, limitaciones en tamaño del objeto, entre otros. Sin embargo, presentan la posibilidad de separar la imagen de fase de la de amplitud. Esto permite que se pueda realizar la demodulación de la fase de manera muy conveniente.

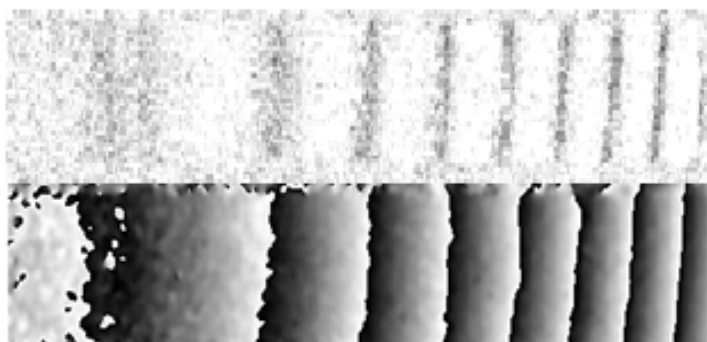


Figura 2- 45. Comparación de la imagen de fase con su correspondiente imagen, luego de ser filtrada con una rutina seno-coseno de múltiples iteraciones.

Independientemente del tipo de holograma, las franjas resultantes de un holograma interferométrico, aportan información sobre el comportamiento del objeto bajo estudio. Este comportamiento guarda una relación directa con el modo de inducción de la deformación. Así el análisis cualitativo o cuantitativo aporta diferentes niveles de información.

3.1. Análisis cualitativo.

Si se comparan los hologramas interferométricos de la figura 2-34 y 2-43, pueden observarse dos tipos de ordenamientos de franjas totalmente diferentes. En la figura 2-34 existe una distribución que a priori podría ser definida como aleatoria, existiendo franjas que se cierran sobre sí mismas y otras que siguen recorridos más extensos. En la figura 2-43 el desarrollo de las franjas es totalmente lineal, siendo un patrón homogéneo con franjas equidistantes. Evidentemente la información aportada por cada uno de los hologramas debe ser sustancialmente diferente.

Para poder interpretar el significado de las franjas una posibilidad es contrastarlas con resultados obtenidos de publicaciones. Así, si comparamos los resultados del holograma de la figura 2-34 con los resultados de los hologramas publicados por Tornari [Tornari, 2006] podríamos asegurar que existen desplazamientos fuera del plano generados por fuerzas internas en el material. Por el contrario en el holograma de la figura 2-43 se podría identificar un comportamiento por dilatación del cuerpo de características ideales.

Un segundo método de interpretar el significado de las franjas es realizar simulaciones computacionales que reproduzcan la forma y el ordenamiento de las franjas.

3.1.2. Simulación de las franjas.

Si programamos el conjunto de ecuaciones definidas desde la 41 hasta la 53, con las cuales modelamos matemáticamente la distribución de las franjas, en un algoritmo computacional sería posible reproducir la distribución de estas en función de una deformación inducida idealmente. Así el algoritmo permitiría reproducir patrones similares a los obtenidos en hologramas y de esta manera obtener una interpretación de la información contenida en el holograma.

Este algoritmo debería contener además las características dimensionales del objeto y todos los parámetros del esquema óptico aplicado durante la construcción de un holograma.

Debe remarcarse que en todos los casos el esquema óptico aplicado es determinante de la distribución final de las franjas. Si por ejemplo se selecciona un ángulo de observación igual al de iluminación, solo serán visibles las deformaciones puras en z , independientemente que el objeto se deforme volumétricamente.

Simulación de deformaciones puras en x .

Utilizando la ecuación 48 en el algoritmo de simulación es posible reproducir el patrón de franjas resultantes a una deformación pura en x . En la figura 2-46 vemos el resultado de ejecutar este algoritmo sobre un objeto plano ubicado en un sistema de referencia tridimensional de coordenadas $[x,y,z]$.

De los cuatro esquemas, en el superior derecho se representa la deformación pura en x , mientras que en el inferior izquierdo el resultado de superponer los tres sentidos de deformación. Evidentemente ambas simulaciones son exactamente iguales.

Así se podría afirmar que:

Si en un holograma se presentan franjas verticales distribuidas uniformemente, entonces la deformación se podría corresponder a una deformación lineal en el eje z .

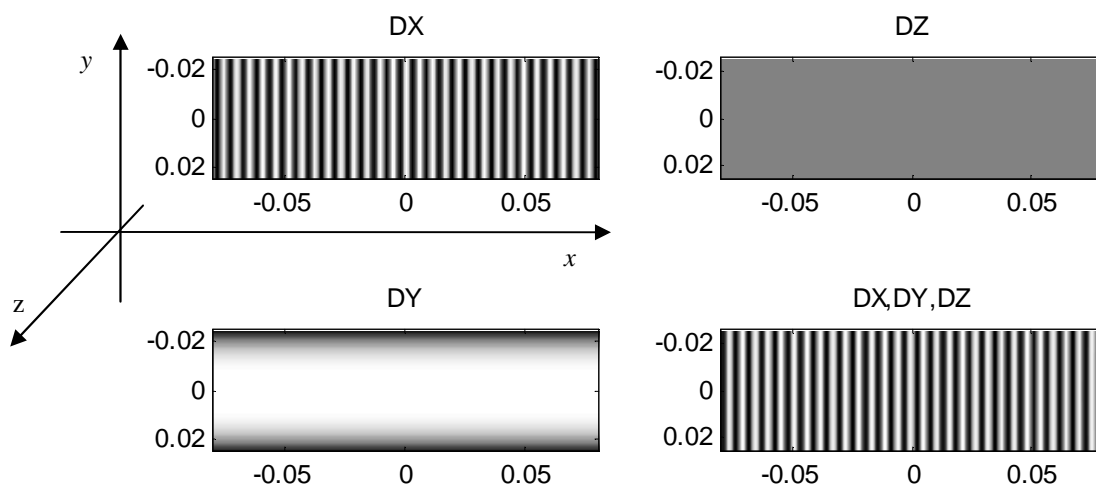


Figura 2- 46. Franjas resultantes de una simulación para una deformación en predominante en x .

Introducción de deformaciones puras en z .

Si en el algoritmo se utiliza como ecuación de referencia la ecuación 44 es posible reproducir la formación de las franjas cuando la deformación es el sentido de la dirección z . En este caso se presentan tres diferentes comportamientos, deformación localizada fuera del plano, una deformación en convexidad o concavidad y finalmente una desplaza angular respecto del eje y .

Introducción de deformación localizada en z .

Este tipo de deformación corresponde a una deformación fuera del plano, ya sea en forma de concavidad o convexidad. Mediante este algoritmo no es posible definir el sentido de la deformación ya que independientemente de este, las franjas obedecen a una distribución similar.

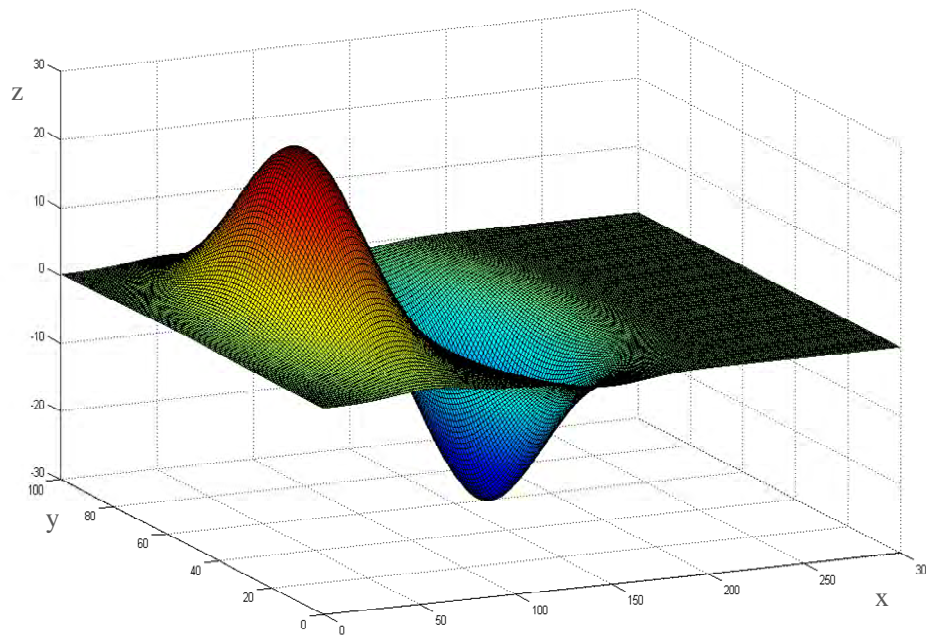


Figura 2- 47. Gráfico que muestra sentidos opuestos de deformación localizada sobre un objeto plano.

En la figura anterior se puede ver el detalle de una deformación bidimensional fuera del plano y en la figura 2-48 las franjas resultantes de la simulación.

Es evidente que estas son iguales en número y solo se diferencian una diferencia de fase de 180° .

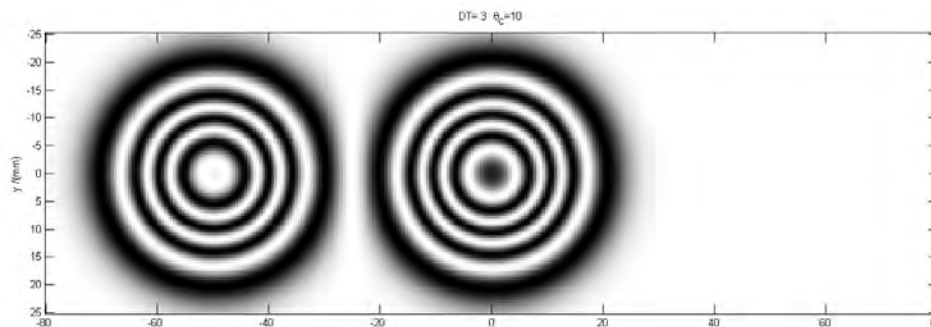


Figura 2- 48. Gráfico que muestra la distribución de franjas resultantes, correspondiente con la deformación de la figura 49.

Así se podría afirmar que:

Si en un holograma se encuentran franjas circulares y concéntricas, entonces la deformación corresponde a una deformación localizada y fuera del plano del objeto.

Introducción de flexiones.

Si se parte de la suposición que el plano se encuentra fijo en su punto medio respecto del eje x , pero tiene libertad de movimiento en sus extremos, podríamos encontrarnos con una deformación como la mostrada en la figura 2-49. En esta claramente se puede observar una deformación que torna al objeto en una superficie cóncava.

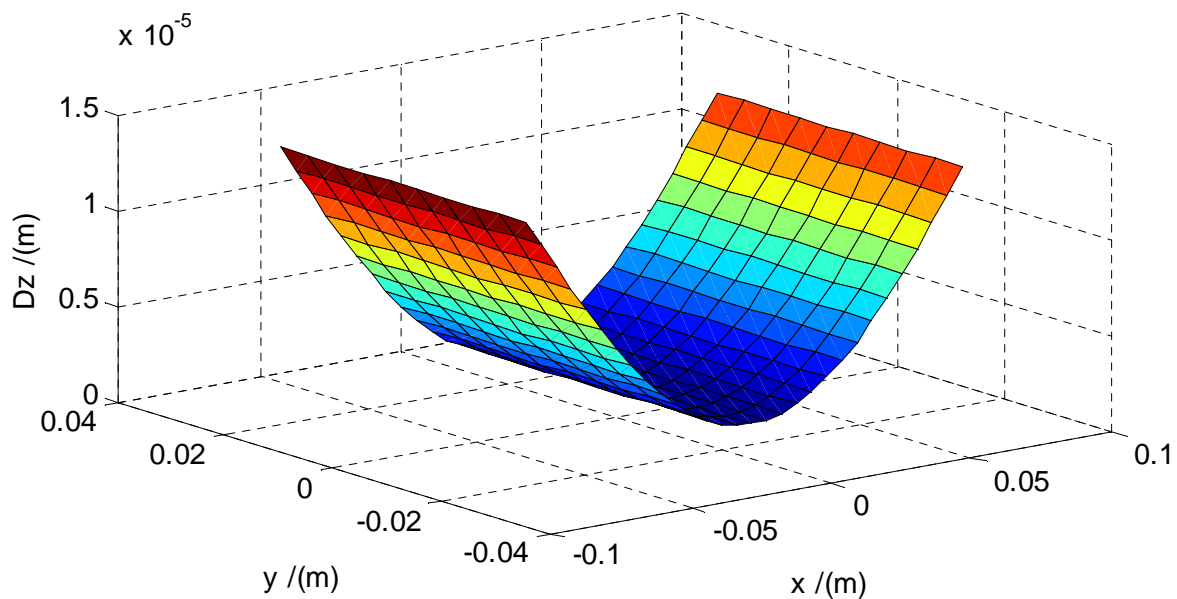


Figura 2- 49. Flexión introducida con centro en x, con dirección positiva en z.

Si el objeto sin deformación se correspondía con un plano, entonces el patrón de franjas resultante de la simulación se corresponde con el mostrado en la figura 2-50.

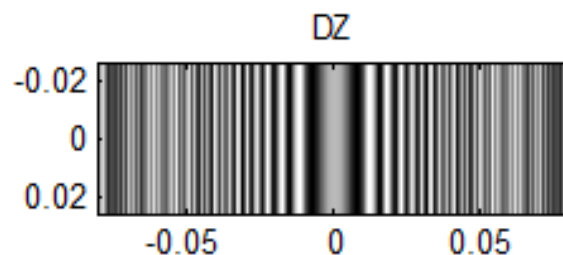


Figura 2- 50. Patrón de franjas resultante de una flexión introducida con centro en x, con dirección positiva en z.

Evidentemente existe una sucesión de franjas verticales que tienden a hacerse más estrechas en los extremos, donde la deformación es mayor, mientras que en el centro se ubica el orden 0 del diagrama de interferencia simulado. Como regla general se cumple que:

Si en un patrón de franjas resultante de un holograma interferométrico se observan franjas verticales con cuyo espesor es de ancho variable, pasando de franjas de mayor espesor a menor espesor, entonces podríamos concluir que estamos en presencia de una flexión. El punto inmóvil del objeto se encontrará siempre en la franja de mayor espesor.

Introducción de rotación.

Por último si introducimos una rotación de la pieza, de manera que el centro del movimiento se sitúe en el eje z dejando fijo el objeto en x, la simulación aporta como resultado un conjunto de franjas horizontales de excursión simétrica con franjas de espesor constante. En la figura 2-51 se muestra un diagrama representativo del sentido de rotación impuesto en la simulación mientras que en la figura 2-52 se puede observar la distribución de franjas definidas por el programa.

Este tipo de franjas es también el esperado cuando la deformación corresponde a un estiramiento de la pieza en el sentido y. Así no podrían distinguirse cuál es el tipo de deformación que representan

estas franjas. Sin embargo, de la ecuación 53 es fácil darse cuenta que los órdenes de magnitud de la deformación que corresponde a igual número de franjas cuando la deformación es en y o en z son muy diferentes.

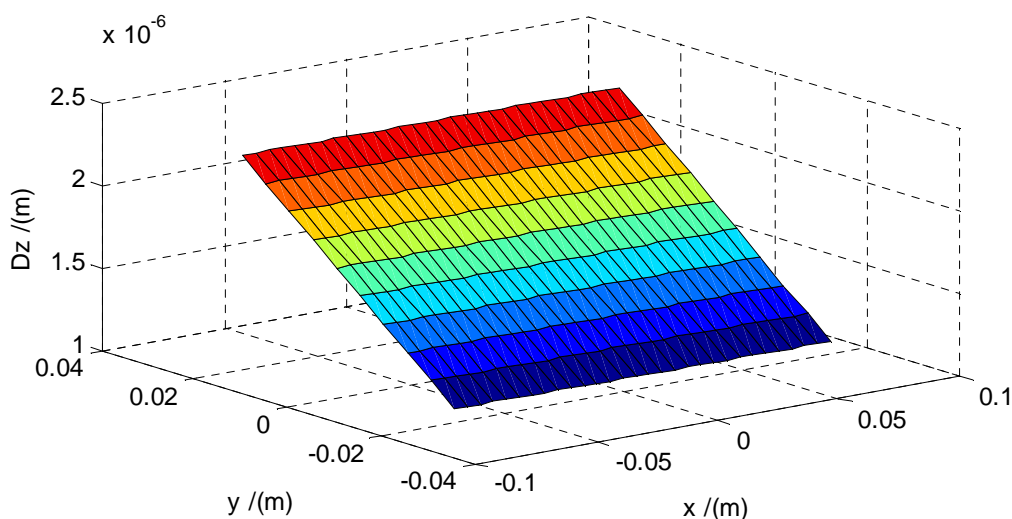


Figura 2- 51. Representación de la rotación introducida en el objeto en dirección z y con centro en z .

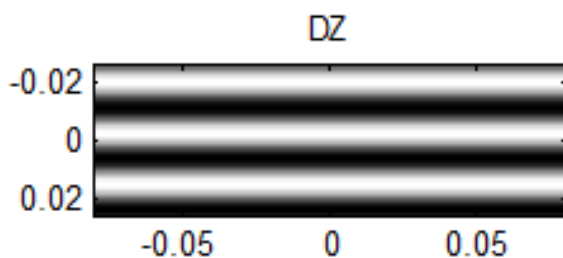


Figura 2- 52. Diagrama de franjas resultante correspondiente con una rotación en z con centro en un extremo.

Así se podría establecer que:

Si en un diagrama de franjas obtenido de un holograma interferométrico, la distribución de estas es horizontal, de espesor constante y equidistantes, entonces la deformación puede responder a una rotación respecto del eje z o bien a una extensión / compresión en el sentido y . Para discriminar el origen deberá realizarse un estudio cuantitativo.

Combinación de deformaciones.

Si se presta atención al patrón de franjas de la figura 2-43 correspondiente al resultado de un estudio de dilatación de un pequeño trozo de una barra de metal, queda en evidencia que el patrón resultante no obedece a ninguno de los analizados anteriormente. Sin embargo, si se realiza una simulación en la cual se introduzca una deformación volumétrica por dilatación, encontramos que el patrón de franjas resultante es totalmente coincidente:

Si en un diagrama de franjas obtenido de un holograma interferométrico, la distribución de estas es de tipo lineal con una inclinación lateral, entonces sobre la pieza predominan deformaciones combinadas y predominantes en $[x, z]$. La inclinación dependerá de la magnitud de cada una de las deformaciones y del esquema óptico aplicado.

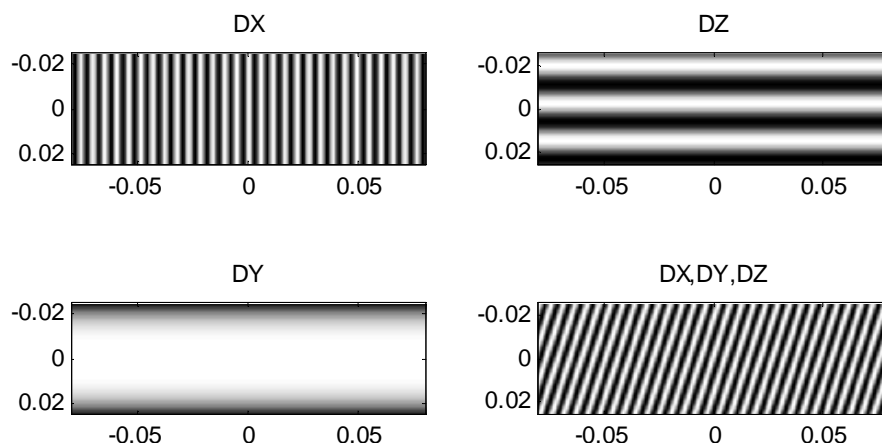


Figura 2- 53. Simulación de la formación de franjas correspondiente a una deformación predominante en $[x,z]$.

Si se observa detalladamente el holograma de la figura 2-34, existen puntos como el E en el cual las franjas toman un ordenamiento particular ya que existe una deformación localizada z , definida por una franja circular, rodeada por un conjunto de franjas que tienden a ser verticales. Nuevamente este es un caso representativo de dos deformaciones combinadas que podría ser equivalente a una deformación lineal en x y localizada en z .

En la figura 2-54 la simulación aporta un resultado similar. La existencia final de una franja cerrada rodeada por curvas dependerá de la magnitud impuesta en la simulación a la deformación localizada en z .

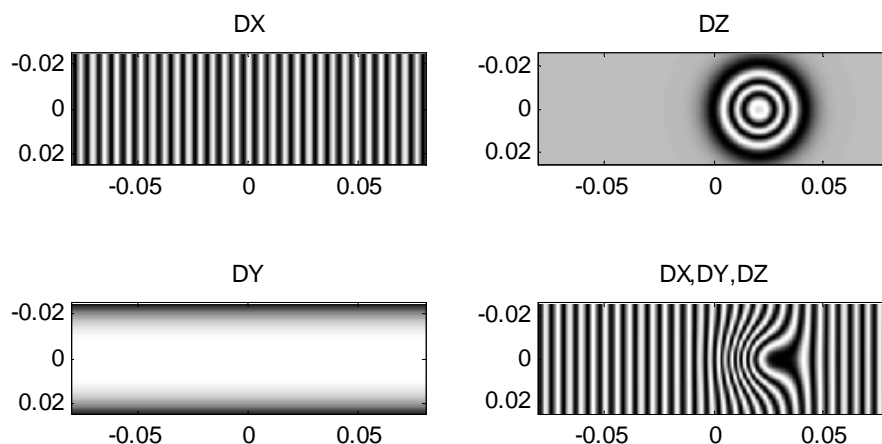


Figura 2- 54. Simulación de la formación de franjas donde se combinan deformaciones en x y localizadas en z .

Por lo tanto como regla general podemos indicar que:

Si encontramos curvaturas en una familia de franjas de excursión vertical u horizontal, sobre el objeto existirán puntos de deformación localizada con dirección z .

Detección de grietas o fracturas.

Uno de los ensayos cualitativos más importantes es la detección de fracturas o grietas en determinados objetos. Dada la magnitud de las deformaciones introducidas en un HI o HID pequeñas fisuras pueden ser detectadas mediante la observación de las franjas. En general, cuando existe uno de estos defectos, las franjas presentan interrupciones o desviaciones en su trayectoria. Si

se las observa con más detalle se podrá observar un quiebre en estas. En la Figura 2- 55 se muestra el resultado de la aplicación de un ensayo de este tipo realizado mediante HID.

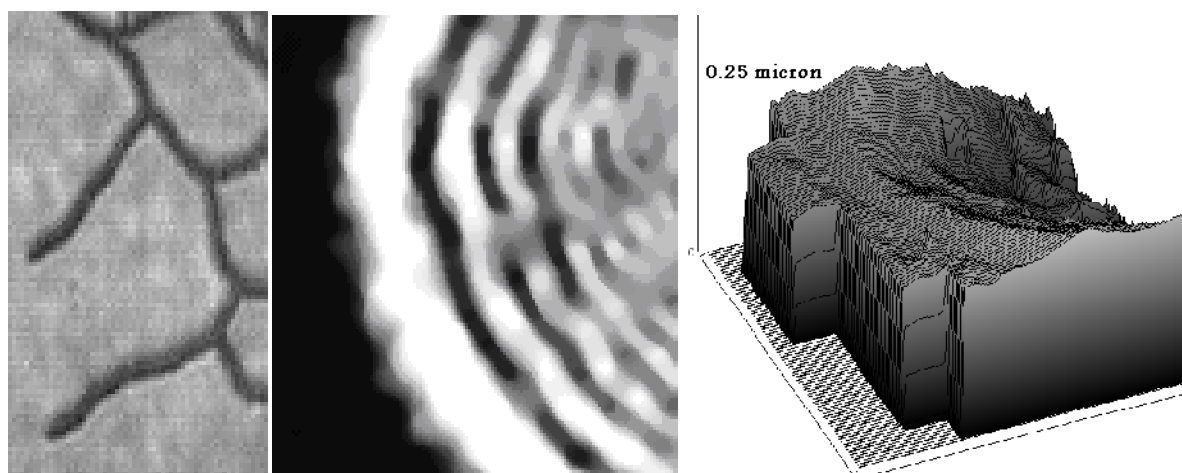


Figura 2- 55. Ensayo por HID para la determinación de grietas en una superficie. [Maaboud, 2010].

La detección de estas suele ser mucho más fácil de encontrar en HI que en HID, fundamentalmente porque en esta última el nivel de speckle suele afectar considerablemente el resultado del análisis. Sin embargo el diagrama de demodulación de fase resulta una herramienta importante para la caracterización de este tipo de defectos.

3.2. Análisis cuantitativo.

El análisis cuantitativo de un HI o HID se sustenta en el número total de franjas que pueden observarse sobre el holograma. El número de estas definirá junto con los parámetros del esquema óptico aplicados a la ecuación 53 la magnitud de la deformación.

En HI el principal inconveniente para lograr la cuantificación se origina en la observación del holograma, particularmente en la definición del ángulo de observación. Como se mencionó anteriormente durante la observación directa surgen múltiples ambigüedades, propias de la visión estereoscópica del hombre. En la figura 2-24 se muestra uno de los primeros sistemas utilizados para la captura de imágenes holográficas en un ángulo fijo de observación y en la figura 2-25 un sistema propio construido para este fin. Cuantificados las distancias y los ángulos en el esquema óptico de reconstrucción, aplicando las ecuaciones correspondientes, es posible relacionar la diferencia de fase total con la magnitud de la deformación.

La HID tiene como principal ventaja la de obtener la reconstrucción de la imagen mediante la utilización de un algoritmo del cual es posible establecer en forma directa la magnitud de la deformación. Mediante la demodulación de la imagen de fase se obtiene la diferencia de fase total. Este valor combinado con la determinación de los ángulos de observación e iluminación permite la obtención de la magnitud la deformación.

En general si las deformaciones son unidimensionales, la cuantificación resulta simple. Sin embargo, cuando la deformación es volumétrica o y libre, como una dilatación, la cuantificación resulta compleja.

De ambos métodos evidentemente la HID resulta la herramienta más adecuada para la cuantificación de las deformaciones.

En los Capítulos III y V se profundizarán los métodos de cuantificación, partiendo de ejemplos de aplicación concretos.

Capítulo III: Resultados de holografía interferométrica convencional.

En el Capítulo II se presentó una somera introducción metodológica, contemplando aspectos teóricos y prácticos de la implementación de la holografía convencional. Además se detallaron los métodos para la realización de ensayos no destructivos (END) mediante holografía interferométrica (HI), describiéndose modelos matemáticos capaces de predecir la formación de franjas de interferencia en los hologramas.

En este capítulo se documentan los resultados obtenidos de aplicaciones de la HI, inicialmente se inducen deformaciones estáticas; particularmente dilatación térmica. En una segunda etapa se documentan los resultados de la inducción de deformaciones por métodos dinámicos: ondas de sonido.

El objetivo de este capítulo es determinar las limitaciones y virtudes de la HI, si bien en alguno de los trabajos realizados se analizaron situaciones derivadas de problemas concretos de ingeniería. En otros solamente se usaron objetos con la presunción de la existencia defectos particulares, buscándose definir la posibilidad de la detección de los mismos.

Los resultados de este capítulo han sido parcialmente divulgados en conferencias nacionales e internacionales tales como la IV Conferencia Panamericana de Ensayos no Destructivos, Foro Iberoamericano de Acústica FIA 2008, Congreso Técnico Internacional BIEL 2005/2007, Congreso Argentino de la Red Vitec y en la publicación SPIE correspondiente a Eighth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques.

1. Inducción de la deformación por métodos estáticos.

1.1. Inducción de las deformaciones por dilatación.

En las deformaciones estáticas, se comparan dos estados dimensionales de un objeto, pueden ser obtenidas mediante diferentes fuentes de inducción. La forma más simple es sin dudas la dilatación libre del objeto. Sin embargo tiene como principal inconveniente la pérdida de la selectividad espacial [Caufield, 1979].

En este apartado se muestran los resultados de inducir dilataciones sobre dos tipos de piezas metálicas. Por una parte, probetas de acero AISI 304 usadas como sustrato para procesos de deposición o plaquado por láser fueron analizadas en busca de fisuras o grietas. Por la otra, se utilizó la HI como método de detección de tensiones superficiales sobre estas probetas.

En una segunda serie de ensayos, las partes E de los núcleos de equipos auxiliares de iluminación, fueron usados como objetos particulares para la determinación de tensiones residuales derivadas de los procesos de corte mediante HI. Nuevamente el objetivo fundamental puede ser definido como la determinación del alcance de la HI. Así, se obtuvieron muestras provenientes de la línea de producción de una fábrica donde el corte se realiza mediante prensa de corte rápido. Posteriormente, se documentó un estudio comparativo de las tensiones residuales derivadas de este sistema de corte y del corte con láser.

Finalmente, se muestran los resultados de una probeta metalográfica obtenida de una estructura de hierro colapsada. Ensayo realizado mediante HI con el fin de buscar defectos en el material, ampliado posteriormente con ensayos mediante HID (Holografía Interferométrica Digital).

1.1.1. Uso de la HI como técnica de análisis y medición.

Definición del objeto y técnica aplicada.

La pieza seleccionada para el estudio del caso testigo fue una probeta metálica de acero ANSI 304 de 50 mm de altura por 10 mm de espesor y 170 mm de longitud denominada probeta n° 1. La deformación fue introducida mediante calentamiento a $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\%$ en una mufla durante un período de 24 h junto al soporte de sujeción, constituido por un soporte de columna y un material térmicamente aislante con el cual se encontraba en contacto la probeta.

La probeta fue ubicada posteriormente en un esquema de doble camino óptico como el documentado en la figura 2-26 del Capítulo II.

Como medio de registro se usó película holográfica de tipo film de 4" x 5" Slavich PFG-01, procesada en cuatro pasos de revelado y blanqueado.

Para éste caso, particular se procedió a realizar una serie de 4 hologramas interferométricos de doble exposición, en intervalos de temperatura de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una variación negativa de la temperatura, analizando por lo tanto la contracción de la muestra.

El análisis aplicado se dividió en dos partes: análisis cualitativo y análisis cuantitativo.

Primera parte: Análisis cualitativo.

Se utilizaron 4 hologramas del ITH2-2007 al ITH5-2007, a los que se les aplicó la metodología de análisis cualitativo indicada en el Capítulo II.

Resultados del holograma ITH 2-2007 / $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$.

En este caso se permitió entre la primera y la segunda exposición un intervalo de temperatura de 10°C , lo que debería permitir una contracción lineal. En la figura 3-1 puede observarse la imagen procesada obtenida del holograma, para un ángulo de observación de 90° respecto del plano de la película.

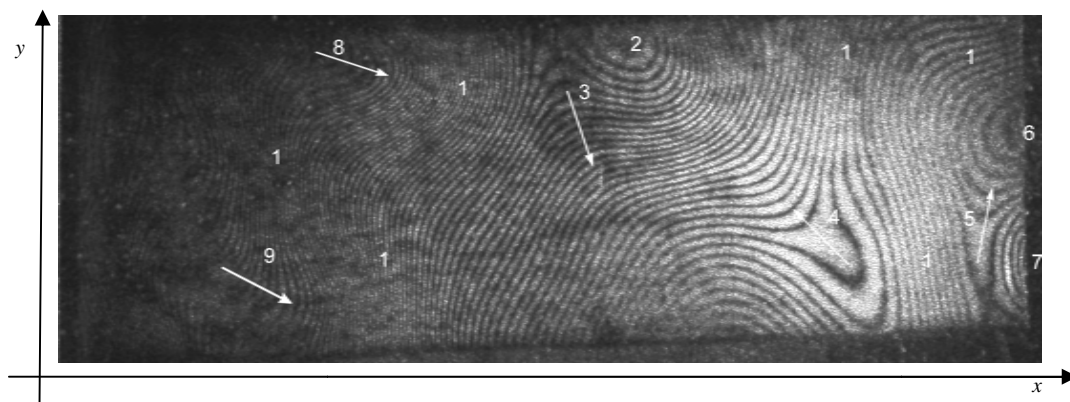


Figura 3- 1. ITH 2-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Además, puede verse la formación de un gran número de franjas, las cuales se encuentran muy cercanas entre sí. Esto, dificulta la determinación de su número. Además es posible observar una distribución uniforme de las franjas en el lateral izquierdo de la imagen y la presencia de deformaciones localizadas en las zonas 2-3-4-6-7. Siendo la de mayor relevancia la situada en la zona 4, donde se manifiesta una contracción de una magnitud menor respecto al resto de la probeta. Comparada con las franjas simuladas mediante modelos matemáticos se observa una predominancia del sentido de deformación en x .

Resultado del holograma ITH 3-2007/ $\Delta T = 5^\circ\text{C}$.

El segundo holograma de la serie se realizó considerando un intervalo de temperatura de 5°C habiéndose operado inmediatamente después de retirada la película del ITH 2-2007. En la figura 3-2 puedo observarse la imagen resultante.

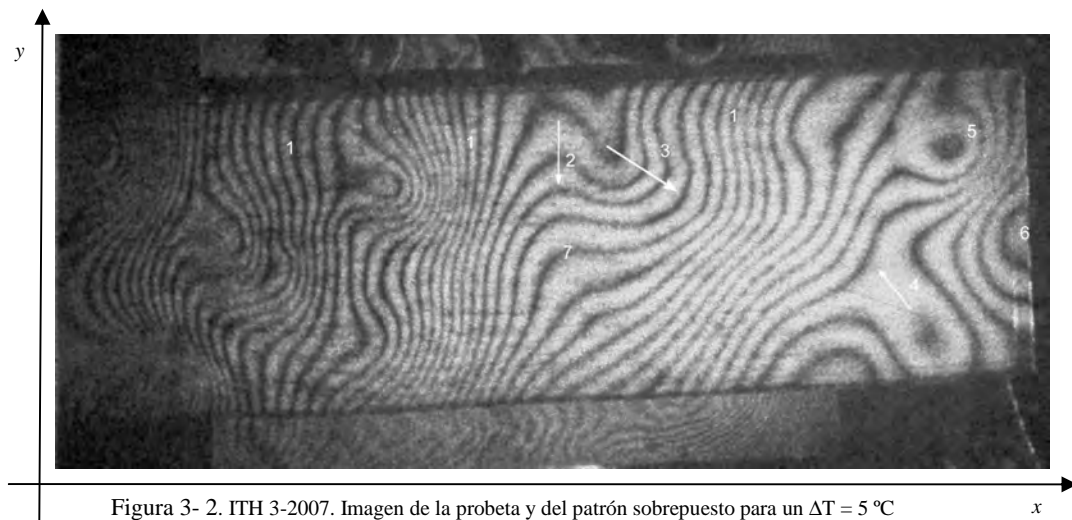


Figura 3- 2. ITH 3-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

En este caso, en condiciones ideales, se esperaría una distribución de franjas equidistantes y con orientación vertical. La figura mostró una distribución no lineal con varios puntos de deformación localizada y franjas ubicadas diagonalmente, repitiéndose los resultados del holograma anterior.

El trazado del perfil de intensidades en el punto medio de la probeta puede ser usado como método aproximado para la determinación del número de máximos de franjas de interferencia que se observaban sobre la imagen. Sin embargo, en este caso, dado el perfil gaussiano del láser, de los niveles de speckle y el pixelado introducido por la cámara de CCD, la información obtenida del gráfico resulta confusa. En la figura 3-3, puede verse claramente los diferentes niveles de intensidad crecientes hacia la derecha del gráfico.

Si se cuentan el número de picos de intensidad es posible determinar la existencia de al menos 48 máximos.

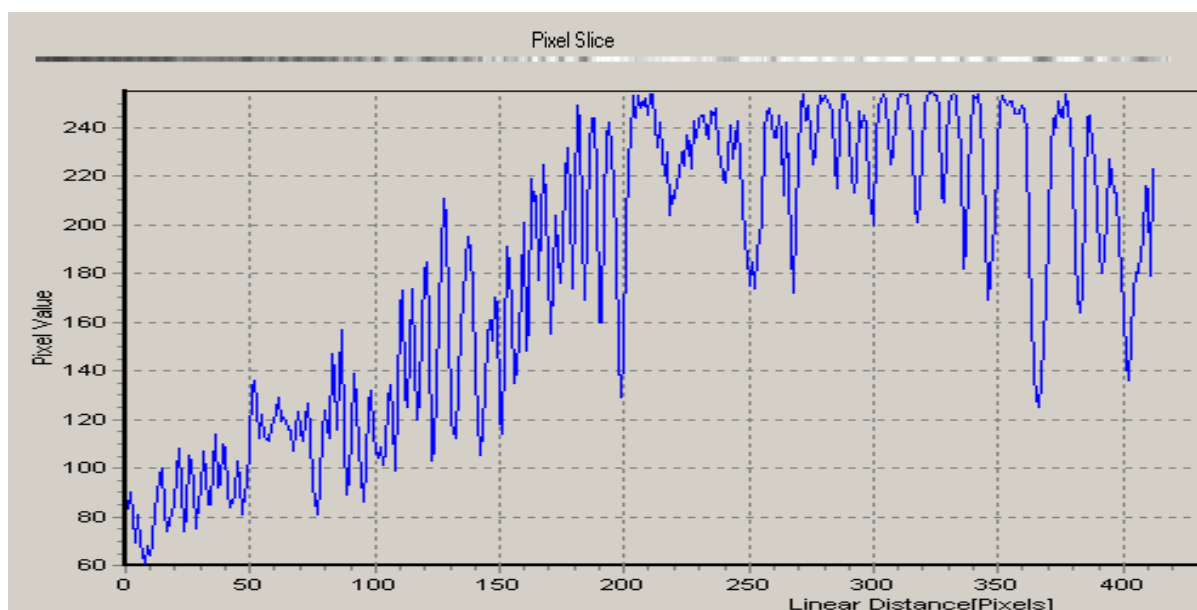


Figura 3- 3. Perfil de intensidades mediante el programa Píxel Profile del ITH 3-2007, zona central.

Resultado del holograma ITH 3-2007/ $\Delta T = 3^\circ\text{C}$.

Dentro del mismo proceso de contracción de la probeta se realizaron dos hologramas sucesivos al ITH 3-2007, uno con un intervalo de temperatura 3°C y uno con un intervalo de $1,5^\circ\text{C}$. En el primer caso se obtuvo una imagen similar en cuanto a la distribución de franjas que las observadas en el ITH 3, pero con una distribución de franjas más homogénea sin observarse puntos de deformación localizados pero respetándose el ordenamiento general de las franjas.

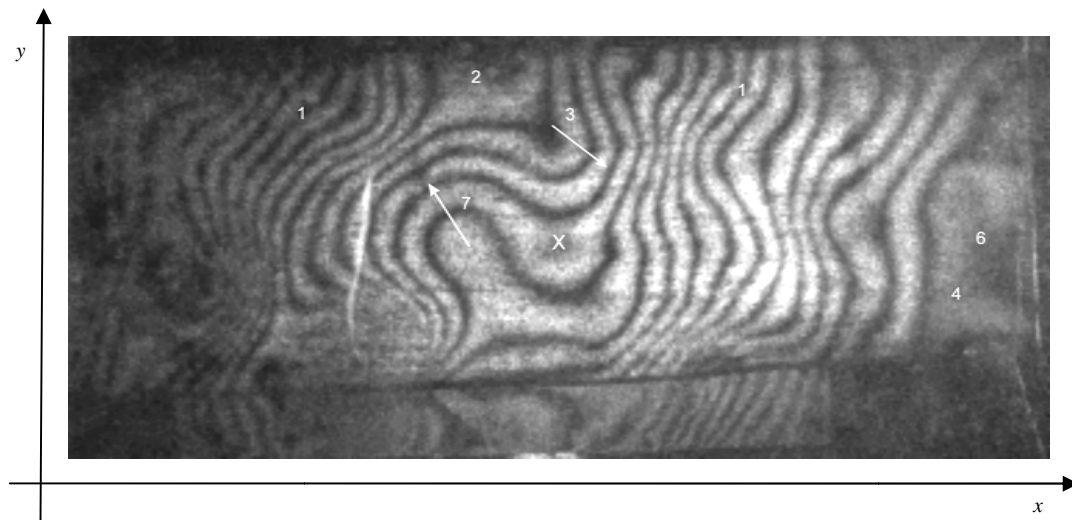


Figura 3- 4. ITH 4-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 3^\circ\text{C}$

Resultado del holograma ITH 3-2007/ $\Delta T = 3^\circ\text{C}$.

El último holograma de la serie fue el holograma que aporta mayor cantidad de información cualitativa, dado que de la observación directa de la imagen resultante podemos notar la presencia de deformaciones localizadas (fuera del plano) de importancia, tales como las indicadas con las letras A,B,C,D en la figura 5. Por otra parte, es posible seguir la trayectoria de franjas que indicarían zonas de igual nivel de deformación o fase constante.

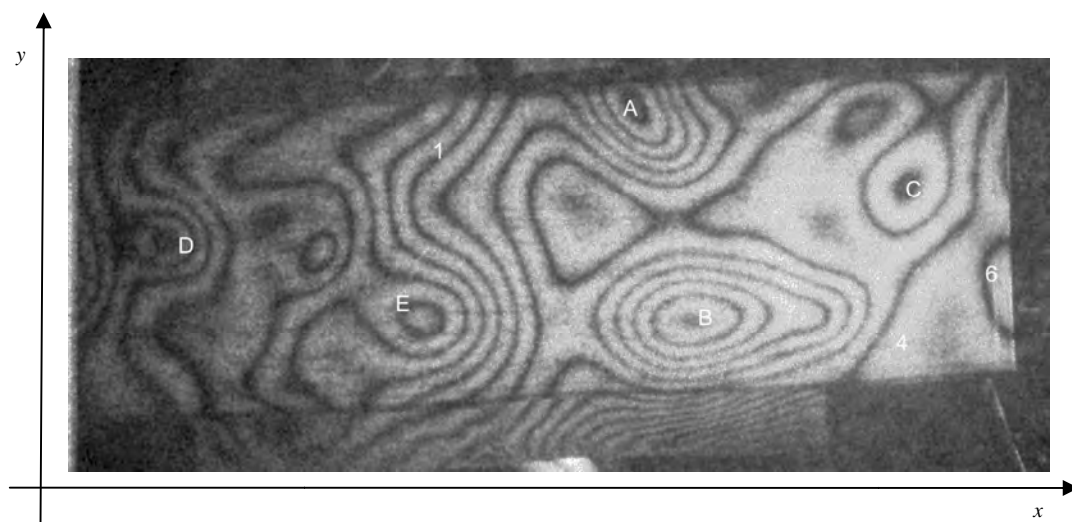


Figura 3- 5. ITH 5-2007. Imagen de la probeta y del patrón sobrepuesto para un $\Delta T = 1.5^\circ\text{C}$.

Desde un punto de vista cualitativo resultan de interés las zonas de franjas cerradas las que representan zonas de deformación localizada, tal como se demostrara en el Capítulo II.

Discusión de los resultados cualitativos.

De la observación de los hologramas y de la distribución de franjas presentes en cada uno de los HI, queda en claro que el comportamiento ideal esperado de la probeta, franjas equidistantes de orientación vertical (comportamiento ideal obtenido de las simulaciones del Capítulo II), no se representa en ninguno de ellos. En todos los casos vemos la existencia de distribuciones que podríamos definir como fuertemente dependientes de deformaciones localizadas. De los cuatro hologramas el de mayor información cualitativa es el holograma de menor intervalo de temperatura (1,5°C) dado que son claramente visibles las zonas de deformación localizada. El origen de estas puede deberse a incrustaciones no metálicas o bien tensiones residuales del proceso de laminación. La excursión de las franjas cerradas, en particular la zona B, hacen pensar que no se trata del primer tipo de defecto, dado que si fuera así el material tendría serias deficiencias en su fabricación, lo cual es poco probable. Es más probable pensar en tensiones residuales derivadas del proceso de laminación.

Evidentemente el análisis cualitativo de una sola muestra no puede dar certeza del origen de las deformaciones registradas.

Medición del proceso de contracción.

Para la correcta cuantificación de las deformación en un HI es necesario definir con exactitud las trayectorias de cada una de los haces involucrados en la construcción del holograma, así como también los ángulos de incidencia y observación de acuerdo con la ecuación 2-52.

Para la obtención de ángulos y trayectorias derivados del esquema óptico, se utilizó una fotografía digitalizada tal como se muestra en la figura 6. Sobre esta, con la ayuda del programa Video Point[®] se midieron las distancias y los ángulos.

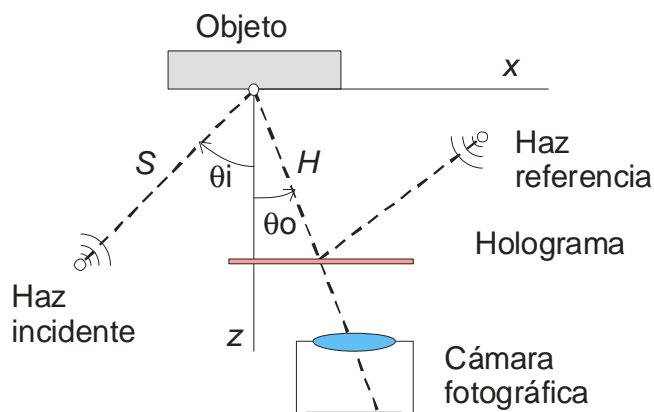
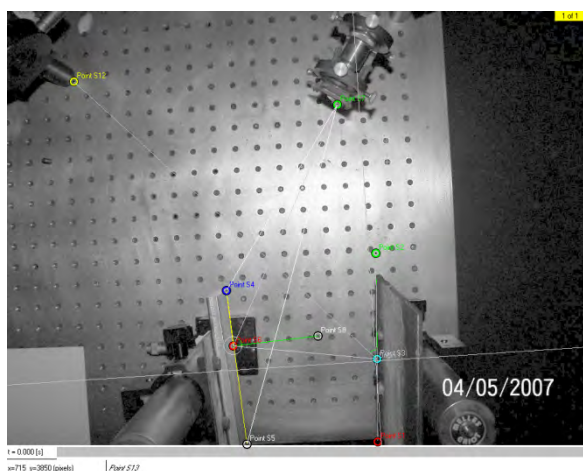


Figura 3- 6. Fotografía utilizada para la definición y cuantificación de las trayectorias y ángulos. Esquema equivalente de reconstrucción.

De las mediciones así realizadas las magnitudes obtenidas fueron:

Distancia haz incidente - haz objeto:	$S = 30 \text{ cm}$
Distancia objeto - holograma:	$H = 17 \text{ cm}$
Ángulo normal objeto - haz incidente:	$\theta_i = -60^\circ$
Ángulo normal objeto - holograma*:	$\theta_o = -11^\circ$

(*) El ángulo θ_o está definido por la posición de la cámara con la que se fotografía el holograma, documentado precedentemente.

A partir de los datos establecidos del esquema óptico, para poder cuantificar la magnitud de la deformación se debe proceder a determinar el número de franjas existentes en el holograma. Cada franja como lo establece la ecuación 2-53 del Capítulo II, representa un cambio de fase de 180° . De la ecuación 2-52, correspondiente a una deformación tridimensional, de la suma del total de los cambios de fase a lo largo de la probeta y de los datos del esquema es posible obtener la deformación sufrida por el objeto.

Cuantificación de las deformaciones en x .

Dados las dimensiones del objeto y el coeficiente de dilatación:

Dimensiones probeta: LX= 160 mm, LY=50 mm, LZ=10.3 mm
 Material; ACERO AISI 304
 Coeficiente de dilatación lineal a 20°C : $\alpha = 17.3 \mu\text{m/m } ^\circ\text{C}$

Es de esperarse que la deformación sea predominantemente en el sentido x del sistema de referencia marcado figuras 3-1, 3-2, 3-4 y 3-5. Por otra parte, las deformaciones en y solo serían visibles en intervalos de temperatura mayores dado que en la ecuación 2-53 las deformaciones en esta dirección se encuentran en una relación cuadrática respecto del cambio de fase.

Para la determinación de la deformación longitudinal se deberá aplicar la ecuación 2-48 la cual contempla un desplazamiento puro en esta dirección. En este caso, la deformación vendrá dada por el número de franjas que atraviesen verticalmente la imagen del objeto.

En el caso de una distribución de franjas ideal esto resulta sumamente simple, sin embargo en los hologramas de las figuras 3-1, 3-2, 3-4 y 3-5 existe cierto grado de dificultad.

El holograma ITH 2-2007 es prácticamente imposible definir el número de franjas existentes, dado la gran cantidad de estas, por lo que solo pueden cuantificarse los otros tres.

En la Tabla -1 se representan los resultados obtenidos de cada uno de los HI

Tabla -1. Relación entre el número de franjas, el intervalo de temperatura y las deformaciones medidas y esperadas.

Holograma	Nº de franjas	ΔT	Cont. Medida	Cont. Esperada
ITH 2-2007	45	5°C	252 μm	14,7 μm
ITH 3-2007	27	3°C	145 μm	8,82 μm
ITH 4-2007	12	$1,5^\circ\text{C}$	65 μm	4,41 μm

Es evidente que la magnitud de la deformación medida es superior a la magnitud esperada en la contracción de la probeta. Este resultado indica que no solo existe una deformación en x .

El análisis cualitativo de los HI, indica la existencia de tensiones residuales, que en puntos particulares presentan una excursión pura en z . Existiendo estos puntos puede plantearse la hipótesis de la existencia de tensiones residuales que durante el proceso de dilatación tiendan a curvar la probeta de acero. Así, existirían al menos dos deformaciones predominantes.

Mediante simulaciones, aplicando los algoritmos de Matlab[®] usados en el Capítulo II al hacer coexistir dos deformaciones como estas se obtiene un patrón de franjas como el mostrado en la figura 3-7. En esta, indicada como DX se muestra el ordenamiento de las franjas debidas a una dilatación pura en x . Con DZ se indica el resultado de una flexión de la probeta, tomando como punto de referencia el centro de la misma. DX, DY, DZ muestran el resultado combinado de las deformaciones.

El resultado muestra como las franjas siguen siendo verticales pero su distribución ya no es equidistante. En los HI, este fenómeno también puede ser observado pero además existe una inclinación de las franjas.

De las simulaciones realizadas en el Capítulo II, cuando coexistían una deformación constante en x y un desplazamiento angular del plano del objeto se generaba una inclinación de las franjas.

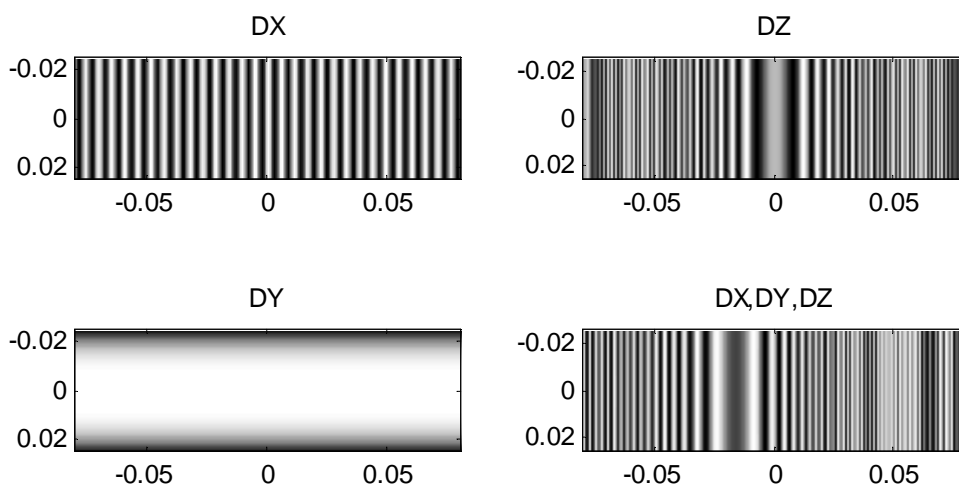


Figura 3- 7. Simulación obtenida mediante la introducción de una flexión de la barra combinada con una dilatación.

Discusión de los resultados cuantitativos.

Es evidente que no existe concordancia entre los valores esperados y los medidos, sin embargo es posible medir el total de la deformación sufrida por el objeto durante el proceso de contracción. Sin embargo, el análisis cuantitativo no es capaz de definir por si solo el comportamiento de la pieza. Es la combinación de los análisis cuantitativos y cualitativos lo que aporta información respecto de las deformaciones sufridas por la probeta.

En este caso, se registra una deformación directa entre el cambio de temperatura y la deformación, cuantificable en magnitud y cualificada con al menos tres componentes: deformación pura en x , flexión en z , desplazamiento en z y deformaciones localizadas en z .

Este holograma ensayo es un claro ejemplo de la dificultad en la determinación del vector deformación mencionado en la bibliografía de referencia [Caufield, 1979] [Hariharan, 1996].

1.1.2. Uso del estudio cualitativo de la HI para la localización de grietas y tensiones residuales.

En el capítulo correspondiente a la metodología se definió en qué forma el análisis cualitativo podía ser usado para la identificación de fracturas. En este apartado mostramos los resultados obtenidos de la aplicación de este método a probetas de acero AISI 304 usadas como sustrato en procesos de deposición por láser.

El plaqueado láser es una tecnología que usa un haz láser más o menos desfocalizado para fundir localmente la superficie de un material y, simultáneamente, el material del recubrimiento para formar una capa con las propiedades deseadas después de la solidificación [Amado, 2011].

Las muestras fueron seleccionadas de un conjunto de muestras desechadas, correspondientes a ensayos de puesta a punto de este proceso. Las muestras consideradas defectuosas, resultan de particular interés para definir las ventajas y limitaciones de la HI como método de ensayo no destructivo.

El esquema utilizado para la realización de los hologramas es el mostrado en la figura 2-26 del Capítulo II.

Se realizaron dos grupos de ensayos: de corte transversal a la zona de deposición y de vista superior a la zona de deposición.

Resultados obtenidos sobre un corte transversal.

Holograma H9.

En este holograma se ensayó, como práctica innovadora en la HI, la utilización de una lente convergente, que como lupa tiene la función de magnificar la imagen de la zona bajo estudio. Esta lente, de distancia focal de 5 cm fue ubicada a 3 cm del objeto de manera de obtener una imagen virtual directa y con un importante aumento lateral tal como se muestra en la figura 3-8. Además, en esta figura muestra la imagen entregada por el holograma H9. En la fotografía puede verse claramente la zona magnificada sobre la pieza previamente seccionada transversalmente al cordón de deposición. Por otra parte, si bien se observa en segundo plano, existe una probeta montada en el mismo soporte y en la cual se distingue claramente el cordón de deposición.

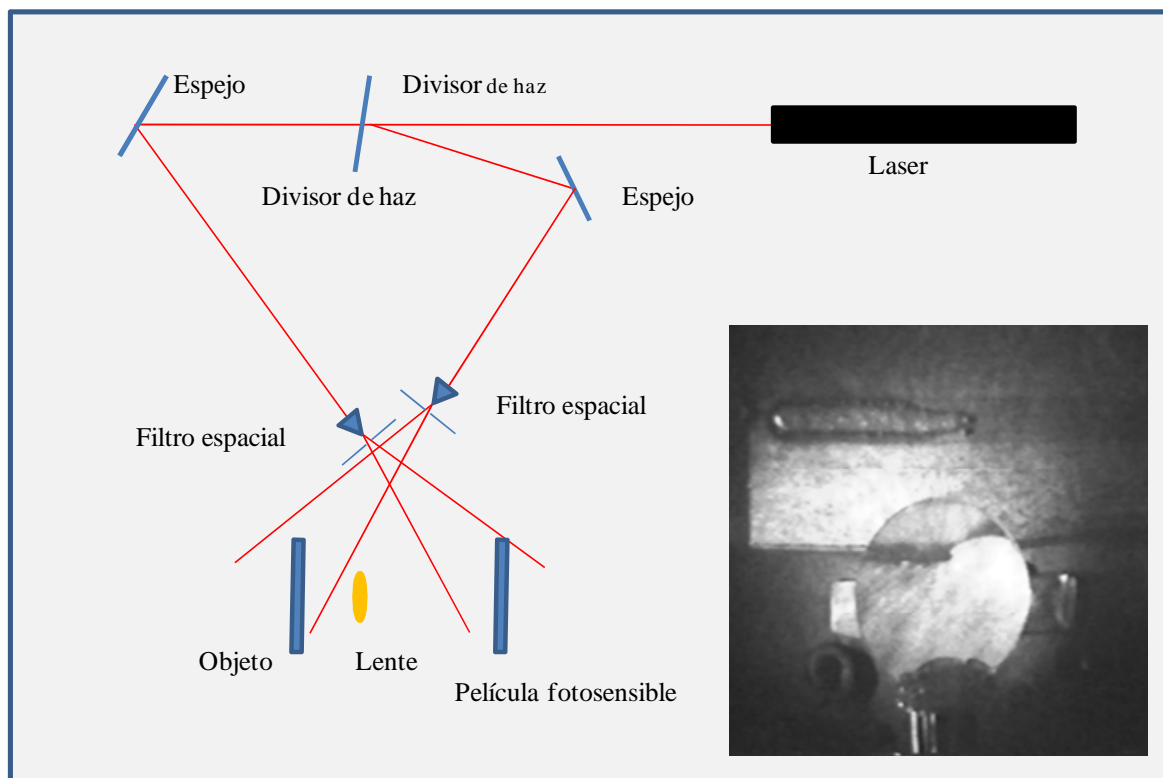


Figura 3- 8. Esquema modificado para la introducción de una lente convergente y fotografía del holograma resultante.

Holograma ITH-10 2007/ $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$.

Este holograma fue realizado con una diferencia de temperaturas de 3°C . La imagen obtenida muestra claramente la existencia de franjas de interferencia con una inclinación cercana a 45° indicando la coexistencia de desplazamientos en x y z .

En todos los casos las franjas muestran continuidad, indicando la inexistencia de grietas en la zona de coyuntura entre la probeta y el material depositado.

Tampoco se observan curvaturas en las franjas que pudieran sugerir coeficientes de dilatación diferentes.

Resultados obtenidos para ensayos de vista superior.

La siguiente serie de hologramas fue destinada al análisis de la deposición del recubrimiento sobre la probeta, analizada en diferentes intervalos de temperatura, con el fin de localizar grietas en el

desarrollo longitudinal del proceso de deposición. Además, como objetivo secundario, se buscó la posibilidad de definir tensiones residuales sobre la probeta.

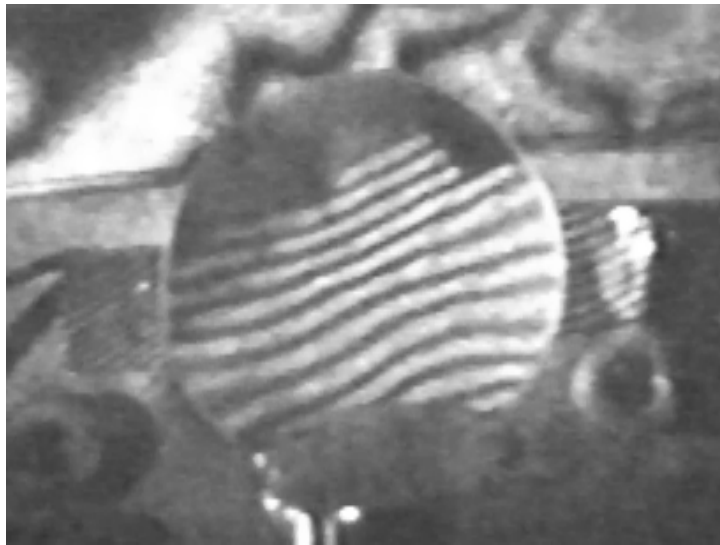


Figura 3- 9. HI resultante de la dilatación de una probeta con un $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$, vista a través de una lupa.

En la muestra bajo estudio, definida como probeta n° 2, se pueden distinguir claramente dos zonas de interés: la zona de material depositado propiamente dicha y la de acción directa del láser que no fue recubierta por el material.

Tal como lo muestra la figura 3-10, se puede distinguir alto grado de afectación térmica donde el láser actuó fundiendo la superficie. El resto de la probeta no presenta alteraciones y puede ser tomada como referencia.



Figura 3- 10. Fotografía que muestra el estado de la probeta n°2 al momento de ser realizado el ensayo por HI. (b) Esquema del proceso de recubrimiento por láser de potencias [Amado, 2011].

Holograma ITH -12 2007 / $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$.

Este holograma fue realizado con un intervalo de temperaturas de 5°C , tomado en el interior de la probeta mediante la inserción de un sensor tipo termocupla K.

La distribución de las franjas obtenidas en el holograma resulta de alta densidad, muy cercanas entre sí, lo que impide visualizar correctamente la existencia de tensiones residuales. Sin embargo, puede notarse una distribución paralela de las franjas en la zona cercana a la deposición, las cuales definirían una uniformidad de comportamiento y la inexistencia de fracturas sobre la superficie.

En la zona de acción directa del láser se observa una suerte de distorsión en la distribución de las franjas, si bien no es posible mediante la fotografía obtenida del holograma poder definirla con claridad.

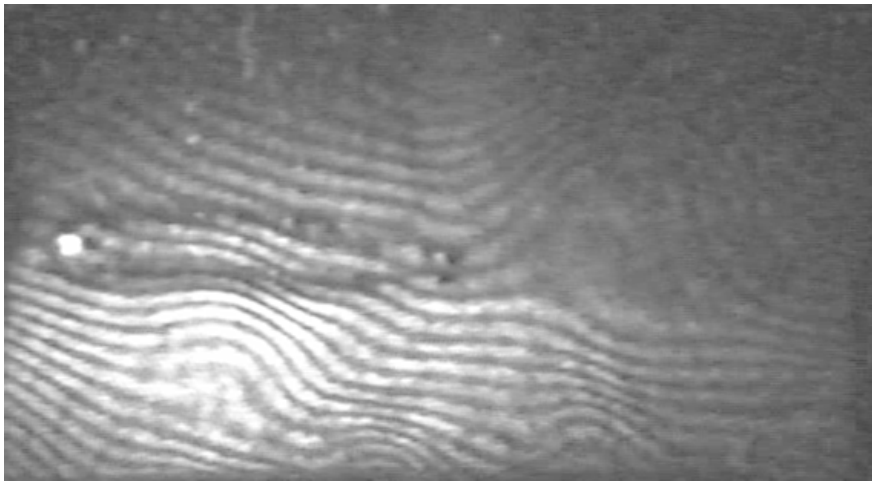


Figura 3- 11. Imagen resultante del ITH-12, probeta n° 2, con un intervalo de temperatura Δt 5 °C, las franjas se encuentran distribuidas en forma uniforme pero muy cercana entre sí.

Holograma ITH – 13 2007/ $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$.

Este segundo holograma, con similar intervalo de temperaturas, se obtuvo con el fin de comprobar la repetitividad del resultado anterior y buscando mejorar el contraste en las franjas. Al igual que lo observado en ITH-12 vemos que la distribución de las franjas sigue siendo homogénea en gran parte de la probeta y en particular en la zona de deposición del material. En la zona asociada a la acción directa del láser se presenta una distorsión en la distribución de las franjas, es de notar que dicha distorsión está asociada a una deformación notablemente menor que el resto de la pieza. Si se realiza una comparación rápida de la cantidad de franjas, entre ambos hologramas, se puede observar que las franjas se encuentran más distanciadas, en función de haber cambiado el ángulo de observación.



Figura 3- 12. Interferograma ITH –13, probeta 2, con un intervalo de temperatura Δt 5 °C, las franjas se encuentran muy cercanas y distribuidas uniformemente.

Holograma ITH – 14 2007/ $\Delta T=3^{\circ}\text{C}$.

Si se disminuye el intervalo de temperaturas las deformaciones tienden a ser menores y por lo tanto los patrones de franjas se redistribuyen, teniendo de esta manera un mejor panorama del comportamiento real de la pieza. En el holograma ITH – 14 el intervalo de temperatura ha sido reducido a 3°C , el esquema es similar en todos los aspectos y el ángulo de observación es de 90° respecto del plano de la película.

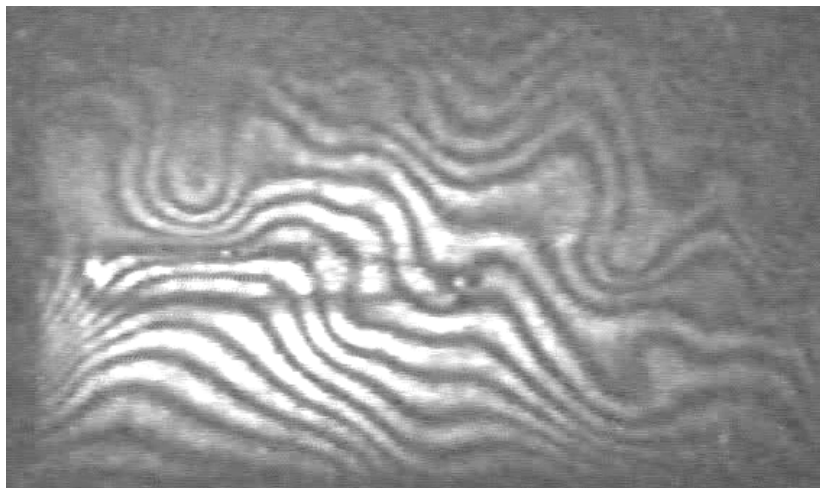


Figura 3- 13. Interferograma ITH-14, con un intervalo de temperatura $\Delta t - 3^{\circ}\text{C}$, probeta 2, las franjas muestran un distribución uniforme en la zona de recubrimiento, detectándose deformaciones localizadas y tensiones en la zona afectada térmicamente.

Con intervalo de temperatura menor se puede observar una distribución de franjas diferente a la presente en los ensayos precedentes. En el extremo superior izquierdo, sobre la zona en la que se ha realizado el recubrimiento, vemos franjas circulares que representaría una deformación localizada fuera del plano, similar a las observadas en la probeta sin recubrimiento. En la zona inferior izquierda las franjas se presentan muy juntas unas de otras respecto del patrón presente sobre el resto del objeto, esto puede tener diferentes interpretaciones dado el ángulo de observación. Básicamente, la cantidad de franjas es constante en toda la superficie del objeto pero existen zonas en las que el desplazamiento ha sido mayor.

Respecto del área en la cual existe deposición de material de recubrimiento, es notable observar la distribución homogénea de las franjas, que se ubican en forma paralela a la dirección de recorrido de la boquilla. Por otra parte, se puede observar que en la medida que el material depositado va perdiendo espesor las franjas tienden a ser verticales lo que indicaría un comportamiento diferente de la pieza bajo estudio. En ningún momento las franjas pierden continuidad al cruzar de un lado a otro de la cobertura, indicando uniformidad del recubrimiento y la ausencia de grietas.

Discusión de los resultados cualitativos en la detección de grietas o tensiones residuales.

Del ITH-10 2007, es concluyente la existencia de uniformidad de comportamiento entre el acero del sustrato y el material usado en el recubrimiento. Puede observarse que si bien existe una zona de fusión de ambos materiales, no existen fases detectables.

De los ITH -12 y ITH -13, vemos que existe sobre la zona de afectación térmica generada por el láser una distribución de las franjas mucho menos uniforme que en el resto de la probeta. Esto indicaría que se han generado tensiones residuales sobre en la pieza bajo estudio. Del ITH-14, podemos reafirmar la existencia de tensiones residuales sobre la zona térmicamente afectada, pero también en la zona superior izquierda. Esta última, residual del proceso de laminado de la probeta ya que no existe efecto directo del láser de potencia y guarda similitud con lo observado en la probeta nº 1.

Es notable la uniformidad en la distribución de las franjas en el recubrimiento, así como también el cambio en la dirección cuando este comienza a disminuir su volumen.

De lo observado se puede concluir que no existen fuerzas o tensiones residuales de importancia en el área de interés (recubrimiento) siendo los efectos térmicos asociados al proceso de deposición poco influyente. Sin embargo es posible detectar tensiones residuales tanto en la zona afectada térmicamente por el láser como en el resto del objeto.

1.1.3. Uso de la HI en el estudio comparativo del corte con prensa de corte rápido y láser de CO₂, sobre acero Si usado en la fabricación de transformadores.

Objetivo.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio comparativo y cualitativo de las piezas resultantes de los procesos de corte de partes E de núcleos de equipos auxiliares de iluminación. La comparación se realiza sobre muestras cortadas por métodos industriales tales como la prensa de corte rápido y el corte con láser de potencia en laboratorio.

Procedimiento.

Se utiliza la técnica convencional de interferometría holográfica de doble exposición, usando el esquema óptico de la figura 2-26.

La primera serie bajo estudio fue realizada sobre muestras obtenidas de la línea de producción de una fábrica de equipos auxiliares de iluminación, destinados a lámparas de sodio de 70 W. La herramienta de corte utilizada fue una prensa de corte rápido.

Las muestras fueron seleccionadas aleatoriamente del par de bocas de salida existentes en la máquina.

La segunda serie fue realizada sobre muestras cortadas con láser de CO₂, sobre material obtenido del rollo de alimentación de la prensa de corte rápido. El láser, de funcionamiento continuo, fue regulado a una potencia de 400 W derivando en una velocidad de corte de 3 cm/s y utilizándose como gas de aporte nitrógeno.

Análisis de partes E cortadas con prensa.

Para la muestra catalogada como n° 1 se realizaron un total de 3 hologramas variando los intervalos de temperatura. El primer holograma de la serie fue realizado teniendo en cuenta intervalos de temperatura de 4 °C, tomando como extremos 40 °C para la primera semiexposición y 36 °C para la segunda semiexposición. La toma de temperatura fue realizada con una termocupla de tipo k, con instrumento digital Metrix Ascy II 5390, en un punto considerado de referencia.

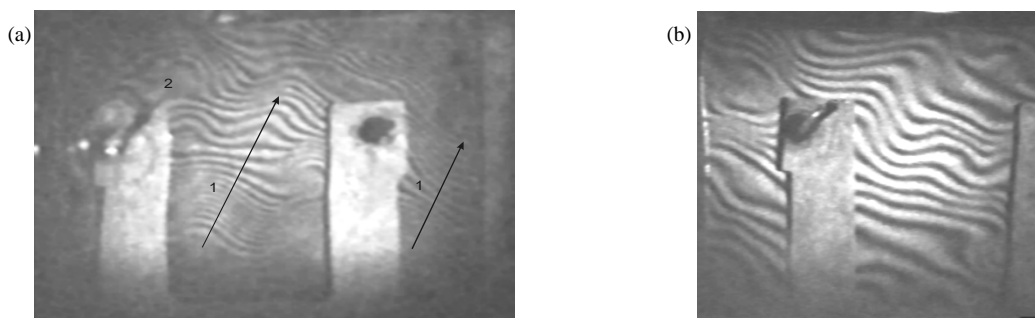


Figura 3- 14. (a) Holograma del núcleo E correspondiente a la muestra 1 con un Δt de 4 °C. (b) Holograma del núcleo E correspondiente a la muestra 1 con un Δt de 2 °C.

En la figura 3-14 (a) puede observarse la imagen fotográfica resultante de la imagen que fuera provista por el holograma. Con un ángulo de observación perpendicular al plano de la placa, el cual fue a la vez paralelo al plano del objeto siéndolo tanto en el plano vertical como en horizontal.

El diagrama de franjas resultante en la zona central y lateral derecha (1), mostró una distribución casi homogénea de las mismas, con un sentido de orientación vertical respecto del plano de la pieza. Encontrándose juntas debido a un intervalo de temperaturas elevado.

No pudieron observarse deformaciones localizadas que pudieran indicar la existencia tensiones residuales.

La figura 3-14 (b), muestra la imagen fotográfica del holograma resultante para un intervalo de temperaturas menor, en este caso 2°C , habiendo sido ubicada la primera semiexposición a 30°C y la segunda a los 28°C . Nuevamente pudo observarse la ausencia de franjas hiperbólicas o concéntricas que indiquen deformaciones localizadas.

Sobre la muestra catalogada como muestra 2, se realizó una serie de 5 hologramas con intervalos de temperatura variables, encontrándose un comportamiento diferente al observado en la muestra 1. En este caso, la información más significativa fue aportada por dos de los hologramas, el correspondiente a una variación térmica de 5°C y el de 2°C . En el primero, si bien las franjas pudieron observarse notablemente juntas debido al intervalo de temperatura, Figura 3-15 (a), existió un ordenamiento hiperbólico, presente en el lateral superior izquierdo. En la zona indicada con el número 2 sobre la Figura 3-15 (a), puedo observarse una zona de poca deformación respecto a las franjas cercanas que la circundan. Estos ordenamientos son indicativos de una deformación localizada fuera del plano.

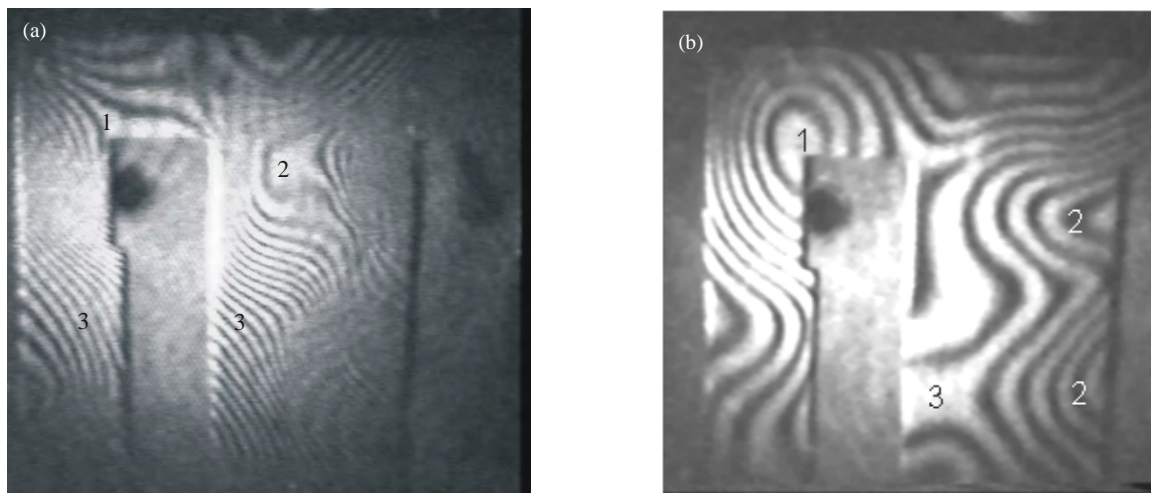


Figura 3- 15. (a) Holograma del núcleo E muestra 2, para un Δt de 5°C . (b) Holograma del núcleo E muestra 2, para un Δt de 2°C .

En la figura 3-15 (b) puede observarse la imagen del holograma resultante para 2°C de variación térmica. Que a diferencia del anterior, el ángulo de observación fue de 40° respecto de la perpendicular al plano del objeto. La variación en el ángulo de observación permite magnificar el ordenamiento de las franjas que indican deformaciones fuera del plano. Si el ángulo de observación fuera igual al de iluminación del objeto solo serían visibles estas.

La imagen resultante mostró un claro ordenamiento circular, que indicó deformaciones fuera del plano en las zonas indicadas como 1, 2 y 3. En la zona 1, pudo observarse que el centro de la deformación fuera del plano se situó en el ángulo interior de la de pieza, fenómeno que puede ser asociado a tensiones residuales derivadas del proceso de corte.

Ensayos posteriores sobre nuevas muestras se encontró similitudes en los patrones de franjas resultantes, pudiéndolas dividir en dos grupos piezas con tensiones residuales y piezas sin particularidades.

Realizada una nueva búsqueda de muestras en la planta se nos informó que cada boca corresponde a una matriz diferente y que las matrices presentan diferentes desgastes en iguales ciclos de trabajo siendo esto una justificación válida para las diferencias encontradas.

Análisis de partes E cortadas con láser.

Para implementar el corte de las chapas de acero silicio con láser, el material fue obtenido de la línea de producción, de los rollos laminados usados en la alimentación de la prensa. El láser de CO₂, fue usado con una potencia de 400 W, utilizándose como gas de trabajo nitrógeno para evitar los efectos asociados a la resistencia a la oxidación que presenta el silicio.

Como consecuencia del proceso de corte se observaron la formación de rebabas, las cuales pudieron ser desprendidas fácilmente ejerciendo una leve presión sobre ellas, ya sea en forma directa con la mano o bien con el uso un filo. La presencia de las mismas hizo pensar que su aplicación a un proceso industrial, implicaría una nueva etapa en la cadena de producción.

De la observación de las piezas obtenidas no se notaron zonas de afectación térmica importante, salvo en los extremos superiores de la pieza donde existía una curvatura en el corte, de dimensiones muy reducidas.

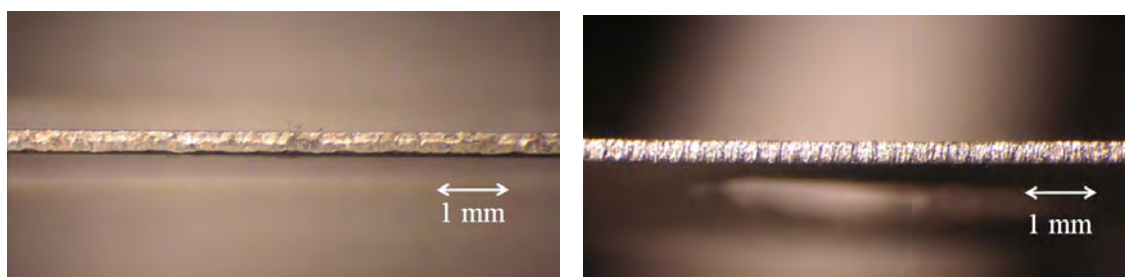


Figura 3- 16. Detalle comparativo del corte resultante con prensa de corte rápido y con láser de CO₂ con potencias de 400 W.

El análisis de la microdureza demostró un comportamiento más homogéneo de la muestra cortada con láser que el de la muestra cortada con prensa. Además, se observó que para zonas cercanas a la zona de corte con cizalla el borde presentó un punto de máxima dureza de 245 HV, decreciendo luego a 148 HV. Estos resultados fueron documentados en los gráficos de la figura 3-17. En función de esto, puede verse que la estructura final de la pieza resultó mucho más homogénea y por lo tanto con menores probabilidades de presentar tensiones residuales por efectos del corte.

En lo que respecta a la técnica de holografía se utilizó el mismo tipo de esquema y similares condiciones a las planteadas en el análisis del primer grupo de muestras.

Es de mencionar que en función de haberse observado la presencia de zonas de afectación térmica en los extremos superiores de las E cortadas con láser, donde existió una zona de corte o concavidad en el material, se procedió posteriormente con la elaboración de piezas con curvaturas suaves.

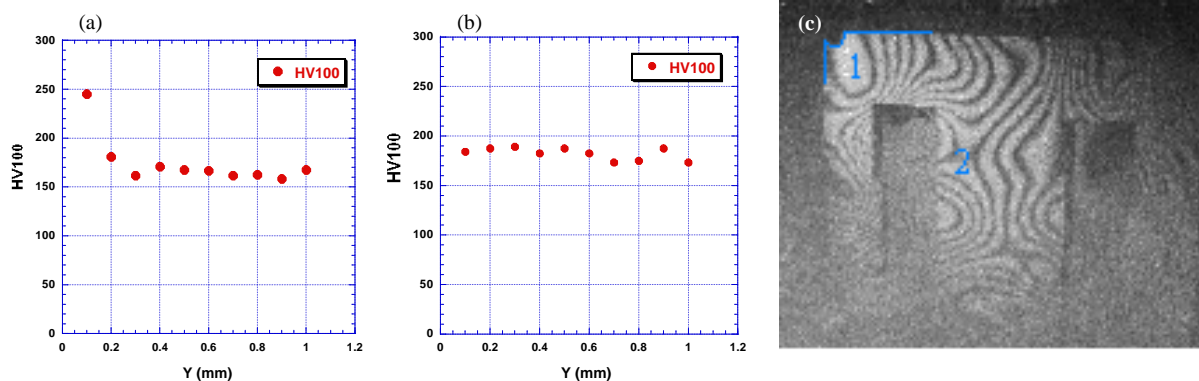


Figura 3- 17. Gráficos comparativos de microdureza de la zona cercana al corte con láser (a) en la zona cercana al corte con cizalla, (b) en la zona cercana al borde cortado con láser. (c) Muestra 1-B, correspondiente a un Δt de 2 °C, cortada con láser de 400 W.

El primer holograma presentado corresponde a la muestra catalogada como 1-B, el cual fue realizado tomando intervalos de temperatura de 3 °C, siendo los extremos 29 °C para la primera semiexposición y 26 °C para la segunda semiexposición. En la figura 3-17 (c), puede observarse la imagen fotográfica que resultara de la imagen provista por el holograma, con un ángulo de observación de 30 ° respecto de la perpendicular al plano de la película.

En el holograma resultante, pudieron observarse dos zonas particularmente interesantes: por un lado la zona indicada como 1 la cual mostró una franja cerrada sobre sí misma y siguiendo la forma de la pieza en ese extremo. Con una línea azul fue resaltada la forma real del objeto y en la figura pudo observarse como las franjas rodean el extremo superior izquierdo.

En esta zona, el láser debió realizar una trayectoria circular de un radio muy pequeño. Como consecuencia el grado de afectación térmica condicionó el comportamiento de la pieza durante el proceso de dilatación.

En función de la distribución de las franjas puedo definirse que la zona 1 presentó una dilatación diferente del resto de la “E”, en la cual se notó uniformidad.

En la muestra catalogada como muestra 2-B, se observó un comportamiento ante la dilatación más uniforme, al ser observado con un ángulo de 40° respecto de la horizontal. Existiendo además, una deformación no lineal en la zona de afectada térmicamente, pero una notable uniformidad en la rama central de la parte E del núcleo. El intervalo de temperatura tomado fue de 2° C.

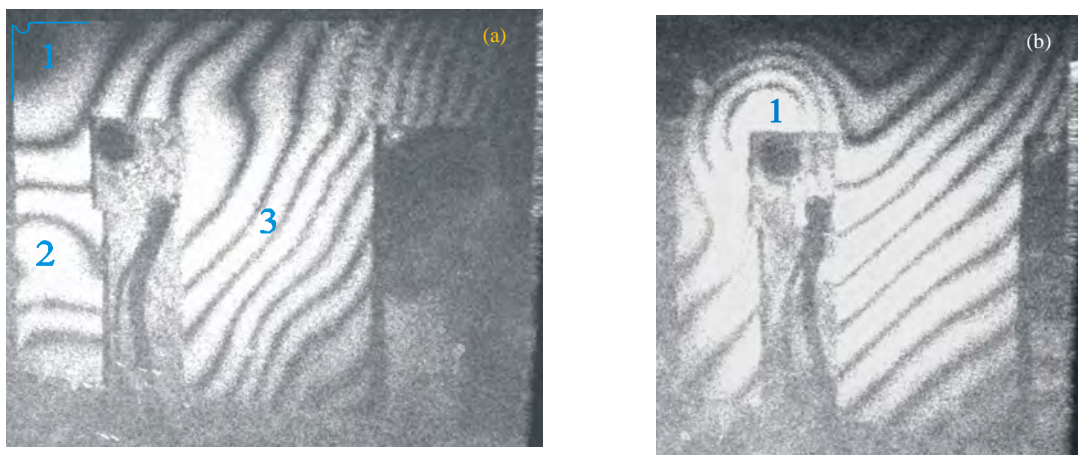


Figura 3- 18. (a) Holograma del núcleo E muestra 2-B, para un Δt de 2 °C. (b) Holograma del núcleo E muestra 3-B, para un Δt de 2 °C.

Nuevamente observamos que existe similitud en el comportamiento de la rama central de las piezas cortadas por ambos métodos.

En el análisis de la muestra catalogada como 3 – B, se repitió un intervalo de temperatura de 2 ° C y fuera obtenida con un ángulo de observación de 35°, se pudo distinguir claramente que la rama central del núcleo presentó una deformación uniforme. Sin embargo, se pudo apreciar una zona de deformación no lineal y localizada en el ángulo interior izquierdo, tal como fuera observado en la muestra 2 figura 3-18.

Análisis de partes E cortadas con láser de forma modificada.

Las piezas analizadas en esta serie, corresponden a muestras modificadas morfológicamente. El rediseño de la pieza puede ser observado en el esquema de corte mostrado en la figura 3-19. En éstas, se eliminaron los puntos angulares externos y se introdujeron curvas en lugar de ángulos en los cortes interiores.

Para el análisis se mantuvieron las condiciones de la técnica holográfica aplicada anteriormente. Los intervalos de temperatura fueron en todos los casos de 2° C.

Para la muestra catalogada como 6-C, figura 63. Las franjas se presentaron con una distribución poco homogénea repitiéndose los patrones observados en casos anteriores en la zona 2. La zona 3 aparece como una zona de deformación localizada de tipo perpendicular. Entre la zona 1 y la 2 se

nota una ausencia casi total de franjas. Es de destacar que en la zona 1 desaparece todo indicio de deformación localizada.

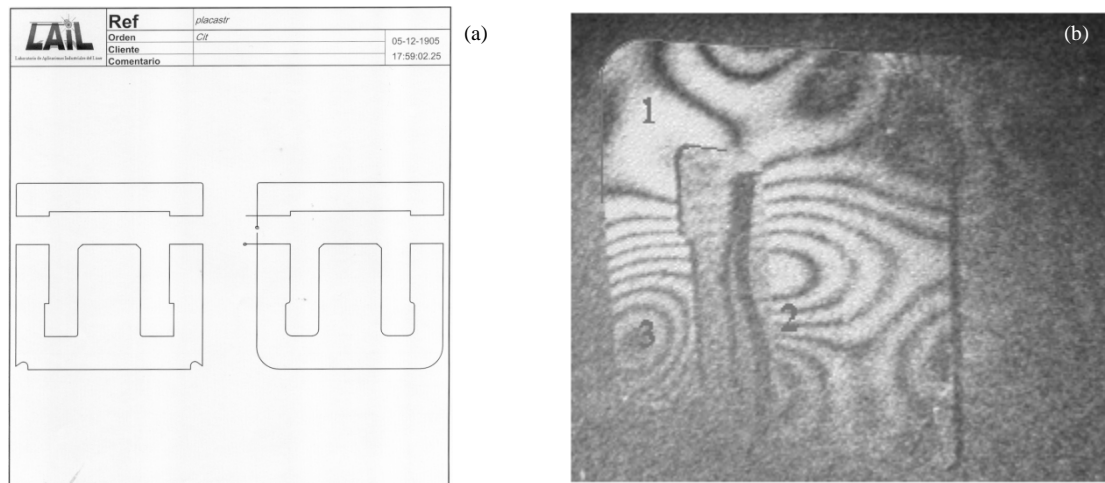


Figura 3- 19. (a) Diseño de piezas introducidas en el CNC del láser, según forma original y modificada. (b) Muestra 6-C, Δt de 2 °C.

Para la muestra catalogada como 7-C, se repitieron las condiciones con ángulos de observación de 35° respecto de la normal.

Del holograma fue posible obtener la fotografía mostrada en la figura 3-20. En ésta, nos encontramos con una zona 1 prácticamente desprovistas de franjas al igual que en la muestra 6-C. Por otra parte se repiten los resultados en la zona 2 ya observados en otros hologramas.

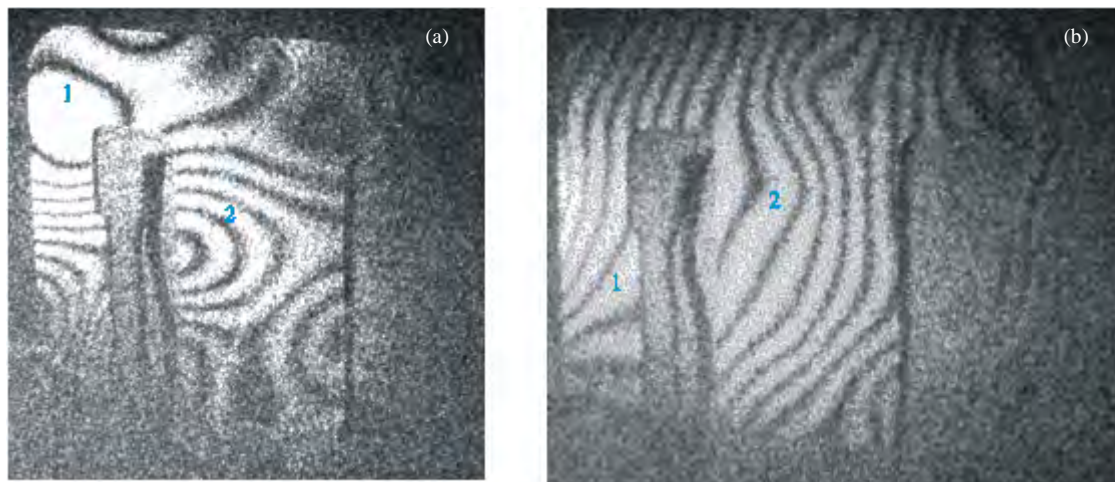


Figura 3- 20. (a) Muestra 7-C, holograma obtenido para un Δt de 2 °C. (b) Muestra 8-C, holograma obtenido para un Δt de 3 °C.

En la muestra catalogada como 8-C, analizada bajo igual ángulo de observación pero con un intervalo de temperatura de 3° C, se puede observar una uniformidad en la distribución de franjas tanto en las zona 2 como en la zona 1. Nuevamente, las muestras cortadas con láser y morfológicamente modificadas desaparecen ordenamientos de franjas localizadas y no lineales en las zonas interiores del núcleo.

Análisis comparativo de partes E cortadas con prensa de corte rápido y láser de potencia.

De los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se puede observar que existen tres tipos diferentes de ordenamiento en las franjas:

- Comportamiento homogéneo.
- Distribuciones de deformación localizada en los ángulos.
- Distribución no lineal en el centro del núcleo de las partes E.

La distribución homogénea fue posible encontrarlas en diferentes muestras ya sean la muestra 1 de corte con prensa, las muestras 2-B y 3-B, de corte con láser y en la muestra 8-C de corte con láser de diseño modificado. Por otra parte encontramos que las deformaciones no lineales, observadas en el centro de las E, se presentan también en los tres tipos diferentes de muestras; en la muestra 2 del corte con prensa, en la muestra 1-B del corte con láser y en las muestras 6-C y 7-C del corte con láser modificado.

Las deformaciones localizadas en las zonas de corte fueron visibles en las muestras 2 de corte con prensa, en las muestras 1-B, 2-B y 3-B.

En función de esto, pudimos ver que existieron dos tipos de deformaciones:

- Las producidas por efecto del corte en función de la morfología del cuerpo o la afectación térmica de la pieza, las que generaron tensiones residuales. Estas desaparecieron al redondear los ángulos (piezas modificadas).
- Deformaciones que representarían tensiones residuales debidas al proceso de laminación del material y que fueron localizadas en diferentes puntos del fleje. Esto se concluyó a partir de considerar la existencia de muestras con un comportamiento totalmente lineal y muestras con deformaciones particulares en el centro de la parte E del núcleo, habiendo mostrado independientemente del tipo de método de corte o forma de la pieza. .

Análisis comparativo.

La prensa de corte rápido indujo tensiones residuales en las piezas cortadas, dependiendo del tipo de matriz y el filo de la cizalla.

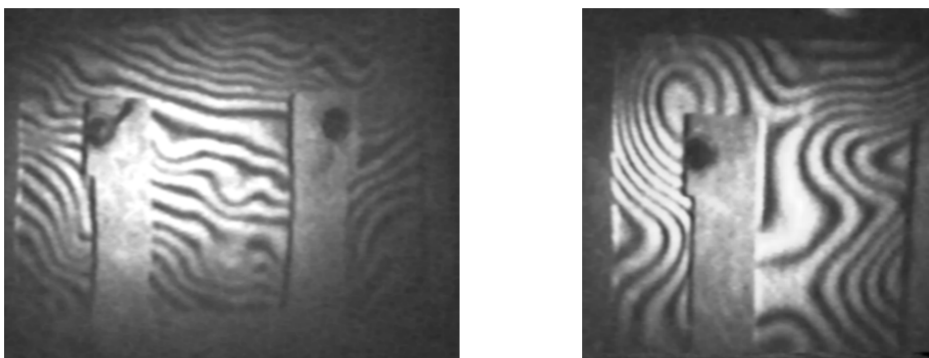


Figura 3- 21. Fotografía de hologramas correspondientes a dos muestras diferentes cortadas con prensa

Existen tensiones residuales que provinieron del proceso de laminación del acero silicio. A esta conclusión llegamos a partir de la existencia de patrones similares con independencia del tipo de corte o morfología de la pieza bajo estudio.

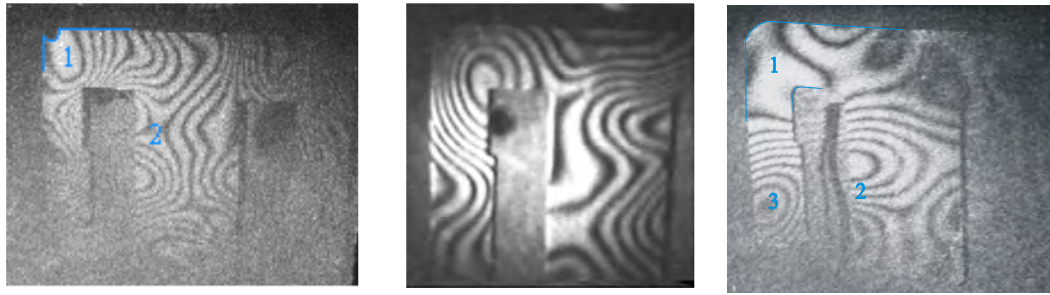


Figura 3- 22. Hologramas de tres muestras diferentes cortadas por ambos métodos, la zona central presenta características similares con independencia del tipo o forma del corte. Tensiones inducidas por la laminación.

En el corte con láser las zonas de corte asociadas a altos niveles de temperatura condicionan el comportamiento de la pieza durante procesos de dilatación, generándose deformaciones orientadas según la figura del corte.

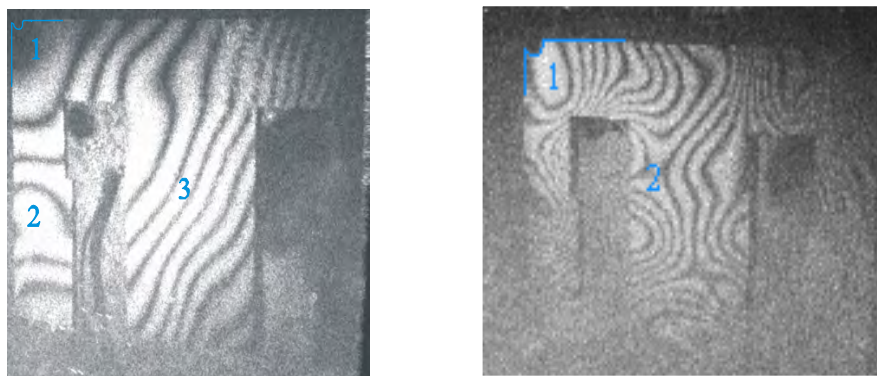


Figura 3- 23. Hologramas de dos muestras diferentes cortadas por láser, ambas muestran disposiciones particulares de las franjas, en la zona de mayor afectación térmica.

1.1.4. Uso de la HI en el análisis cualitativo de una probeta metalográfica.

Las estructuras reticulares de acero nervado, son usadas para la construcción de galpones y techos de chapa de zinc-aluminio. Este tipo de estructura resulta económica, resistente y de rápida construcción.

Sin embargo los fabricantes de hierro nervado desaconsejan su utilización en este tipo de estructura, indicando que es un material diseñado para la construcción de estructuras de hormigón.

Las vigas o columnas de acero reticulado se construyen a partir de pequeños trozos de 10 a 20 cm de longitud que se intercalan entre los soportes principales, constituidos por barras del mismo material de la longitud deseada de la viga o columna. Así es posible construir estructuras rectas o curvas según el diseño o la necesidad.

En este párrafo se muestran los resultados de un estudio realizado en conjunto con el laboratorio de materiales de la UTN Regional Paraná, con el fin de determinar el origen del colapso de una estructura de este tipo.

Clasificación de las muestras entregadas para el análisis mediante HI.

En función del tipo de colapso y de los ensayos metalográficos, realizados por los integrantes del laboratorio de materiales se enviaron un total de cuatro muestras, una probeta metalográfica, un segmento de un soporte principal sobre el cual existe una soldadura de segmentos secundarios, un corte de la zona de soldadura (parte inferior) y un corte de una zona de soldadura (lateral).

Inicialmente se decidió el análisis de la probeta, dado que por los resultados de la metalografía se planteaba como hipótesis de trabajo defectos en el acero.

Resultado de los estudios mediante HI.

Del estudio realizado mediante HI sobre la probeta se pudo definir uniformidad en el comportamiento del material, habiéndose realizado dos hologramas con intervalos de temperatura de 1,5°C y 3 °C.

En ambos casos se pudo observar un comportamiento uniforme del material, lo que lo que indicó que no existían incrustaciones no metálicas u otro tipo de fenómeno que altere la homogeneidad del metal.

Sobre una ampliación de la imagen (b) de la figura 3-24 se realizó un estudio de los perfiles de la imagen, con el fin de definir el número de franjas asociadas al intervalo de temperatura.

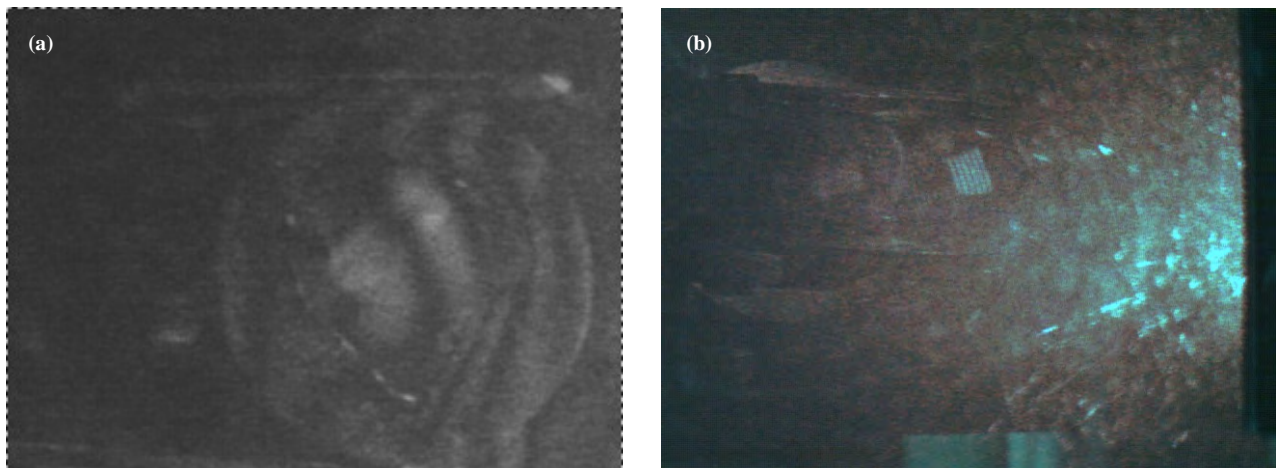


Figura 3- 24. (a) Ensayo sobre probeta metalográfica con un Δt de 1,5 °C. (b) Ensayo sobre una probeta metalográfica con un Δt de 3 °C

De la gráfica del perfil de intensidades se pudo deducir un alto grado de uniformidad en la distribución de las franjas, habiendo sido su número de 7 franjas claras intercaladas a 6 franjas oscuras. La distancia entre los máximos fue uniforme y su inclinación sobre la imagen fue de 107 °, lo que indicó una deformación predominante en x y con desplazamiento menor en z.

Fue evidente que en el material no existían tensiones o incrustaciones que pudieran dar origen al colapso de la estructura, si bien este análisis fue acotado.

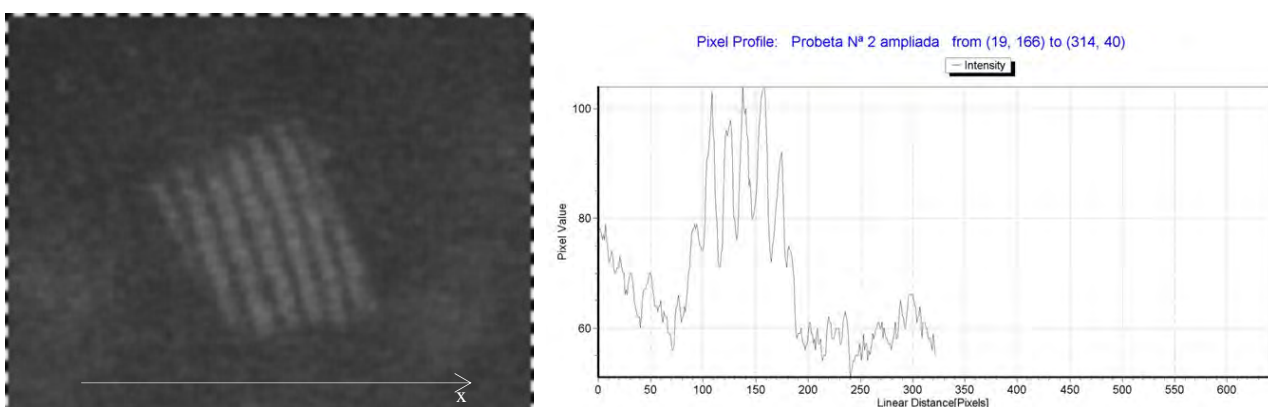


Figura 3- 25. Imagen ampliada de la probeta para 3 °C de Δt y grafica del perfil de intensidad resultante sobre el holograma.

Los resultados elaborados por el Laboratorio de Materiales indicaron como origen del colapso defectos de fabricación en el material, el cual no cumplía con las normativas básicas de resistencia a la flexión y tracción.

El estudio fue posteriormente ampliado mediante HID.

2. Inducción de la deformación por métodos dinámicos.

2.1. Inducción de las deformaciones por ondas de sonido.

Las ondas de sonido son una herramienta de interés cuando se desea inducir deformaciones sobre objetos flexibles, en particular cuando el objeto bajo estudio puede ser sensible a los cambios de temperatura. Un caso particular lo constituyen las obras de arte de alto valor patrimonial.

A diferencia del método estático, en el método dinámico el objeto debe tener la capacidad de oscilar respecto de su posición de equilibrio. Las oscilaciones deben respetar dos aspectos particulares: el período de oscilación debe ser mucho menor que el tiempo de exposición y la amplitud de las oscilaciones no debe ser mayor a 10 longitudes de onda. Así la fuente de inducción debe presentar características especiales. En aplicaciones de HI, siendo los tiempos de exposición extremadamente largos, la primera condición siempre será cumplida. Sin embargo, en HID debe tenerse precaución cuando la cámara es de alta velocidad.

La segunda condición es más compleja desde el punto de vista de la HI, dado que los tiempos involucrados para definir la amplitud de la fuente pueden requerir un esfuerzo extra, en cuanto a la cantidad de HI necesarios para la calibración.

El objetivo de usar ondas de sonido como fuente de inducción de las deformaciones, surge como una propuesta alternativa al uso de fuentes de calor en aplicaciones de la HI cuando se busca evaluar estado de conservación de obras de arte [Tornari, 2007].

Como mecanismo de excitación se utilizó un buzzer PK12-40PA de la firma Hitpoint Inc, el cual presenta una frecuencia de emisión de 4,1 kHz, 80 dB a 5 mA y 86 dB a 9 mA. Esta fuente se seleccionó como una opción a la utilización de altavoces, en los que es posible variar tanto la frecuencia como la amplitud de la onda. Si bien el uso de este dispositivo plantea serias limitaciones, presenta como ventaja fundamental sus dimensiones reducidas. Con un diámetro de solo 10 mm es una fuente ideal cuando se desea inducir deformaciones localizadas y generar un mínimo impacto sobre el objeto.

Inicialmente se desarrolló un sistema para determinar la posibilidad de inducir deformaciones por ondas de sonido, usándose para esto el modelo de la membrana vibrante. La decisión de comenzar con este modelo se sustenta en la similitud existente entre esta y el lienzo de una pintura, objeto final de estudio. A partir de los resultados sobre la membrana vibrante se desarrollaron ensayos que permitieran detectar grietas en una superficie. Las grietas, como también familias de franjas cerradas, son indicadores de daños en las obras de arte. [Asmus, 2003] [Tornari, 2007] [Tornari, 2006] [Hariharan, 1996]. Finalmente se aplicó la HI para evaluar el estado de conservación de un óleo del pintor Italiano Verccelli.

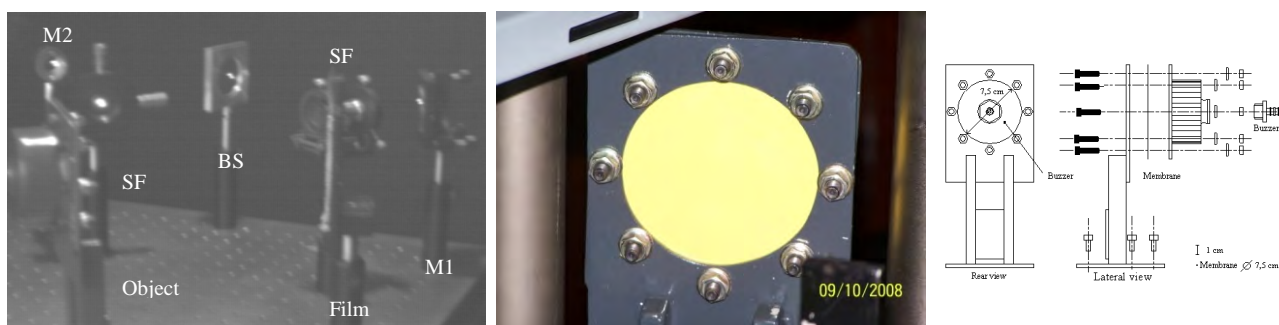


Figura 3- 26. Izquierda: Despiece del sistema utilizado para el montaje de la membrana. Derecha: Esquema utilizado para la obtención de los hologramas; SF Filtro espacial, BS divisor de haz, M1,2 espejos. Centro: detalle de la membrana.

2.1.1. Inducción de oscilaciones sobre una membrana elástica, análisis por HI y contraste por MEF

Para el estudio de una membrana elástica vibrante se utilizó el esquema indicado en la figura 3-26. La membrana construida con una de goma de color amarillo fue obtenida de un dispositivo en desuso desconociéndose sus características.

Resultados.

El primero de los hologramas obtenidos fue realizado con una corriente de excitación de 3 mA, límite de la zona de respuesta lineal del buzzer. En la figura 3-27(a), puede observarse la formación de 3 zonas antinodales bien definidas con una excursión perpendicular al plano de la membrana de magnitud similar en dos de ellas y un poco menor en la zona ubicada arriba a la izquierda. La magnitud de la deformación sufrida durante la oscilación fue de $0,730\text{ }\mu\text{m}$ respecto de la posición de equilibrio.

El segundo de los hologramas aquí documentados, corresponde a una corriente por el buzzer de 5 mA, esto es en el centro de la zona lineal de funcionamiento de este. El holograma, que en este caso fue analizado con un ángulo levemente inferior al de observación de las deformaciones puras en z, mostró la existencia de zonas antinodales ubicadas en la parte superior e inferior izquierdas de una amplia excursión y que dada la falta de claridad de la imagen no es posible cuantificar.

En la zona central de la membrana fue posible definir claramente la existencia de dos zonas nodales ubicadas en una simetría opuesta respecto del centro de la membrana, al igual que en el caso anterior con magnitudes diferentes de deformación.

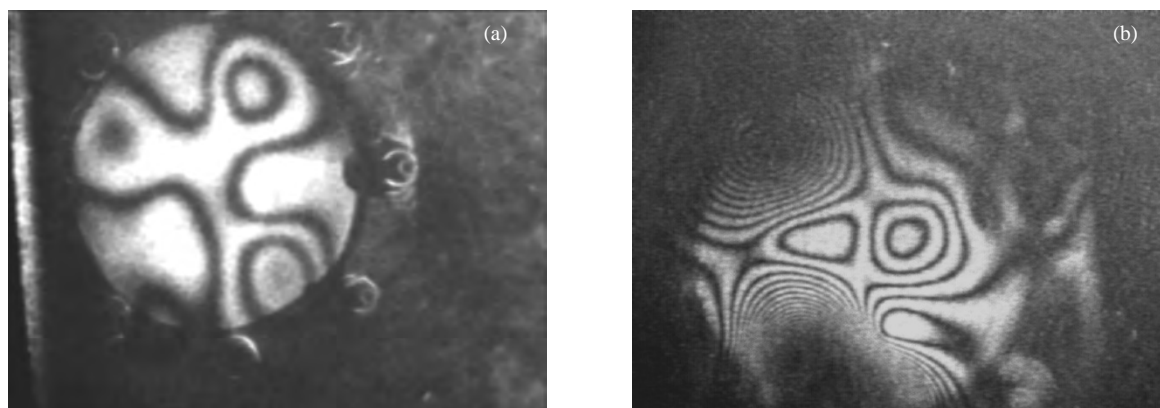


Figura 3- 27. (a) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 3 mA. (b) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 5 mA.

Al elevar la corriente de excitación del buzzer a 8 mA, nos encontramos con un patrón de franjas que representa modos de oscilación totalmente diferente en cuanto a su distribución. En la figura 3-28 (a) vemos representada la imagen resultante para este último valor de corriente. Claramente podemos observar dos zonas antinodales de magnitudes bien definidas encontrándonos con la particularidad de la existencia de una amplia zona nodal en el centro inferior derecho. La izquierda de la imagen representa una zona de una excursión apenas superior a una longitud de onda claramente definida por la línea de división que representa la primera franja a la izquierda de la zona nodal. Existe además, un punto oscuro situado entre los dos antinodos. Este, representa una zona de vibración cuya excursión máxima (inferior – superior) de apenas 1,5 longitudes de onda. Respecto de las magnitudes de deformación registradas, nos encontramos con una excursión máxima simétrica de $0,841\text{ }\mu\text{m}$ en la zona antinodal ubicada en la parte superior de la imagen.

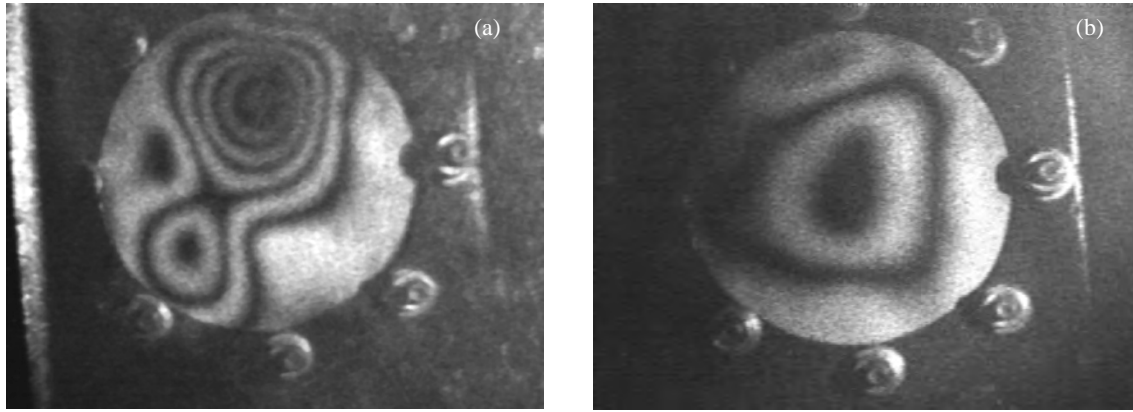


Figura 3- 28. (a) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 8 mA. (b) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 15 mA.

Finalmente la imagen del holograma correspondiente a una corriente de excitación del buzzer de 15 mA, presentó un patrón de franjas de interferencia que claramente demuestran un modo de oscilación cercano a lo que podría definirse como modos de oscilación simétrico. La distribución de franjas es de tipo concéntrica teniendo el punto de mayor excursión de la membrana en el centro de la misma, ubicándose la zona nodal en el borde de esta. La segunda franja no resulta perfectamente circular lo que nos indica que o bien el coeficiente de elasticidad no es homogéneo o existen diferencias de tensión producidas durante la fijación de la membrana al soporte.

Simulación por MEF.

El análisis realizado por MEF consistió en la determinación de modos y frecuencias propias de la membrana de goma utilizada en el ensayo. El modelado fue realizado utilizando el software ALGOR[®]. El modelo fue definido como elementos tipo placa de corte reducido con formulación isoparamétrica de cuatro nodos. Se utilizó una malla no estructurada, tal como se muestra en la figura 3-30 (a), con el objeto de no influenciar en la solución de desplazamientos con una posición simétrica de los nodos.

Para desarrollar el análisis fue necesario realizar una medición de los parámetros que debieron ser considerados para la obtención del modelo, trabajo realizado en el laboratorio de simulaciones por MEF.

Las condiciones de borde simularon el empotramiento real del dispositivo de sujeción, el cual puede ser visto en la figura 3-29 (b). En esta, la membrana fue sujeta mediante dos aros paralelos los cuales se los unió entre sí mediante tornillos.

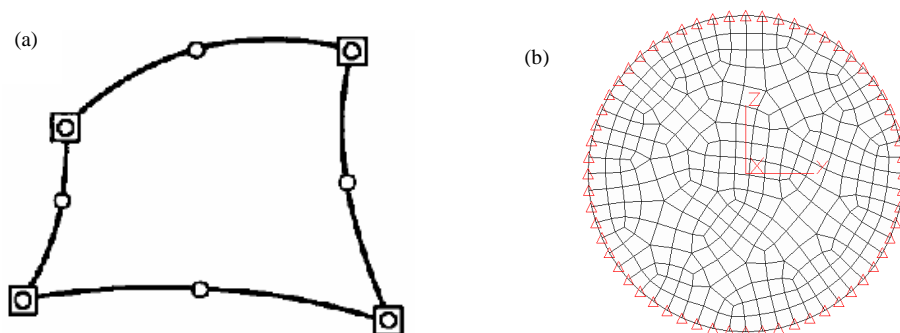
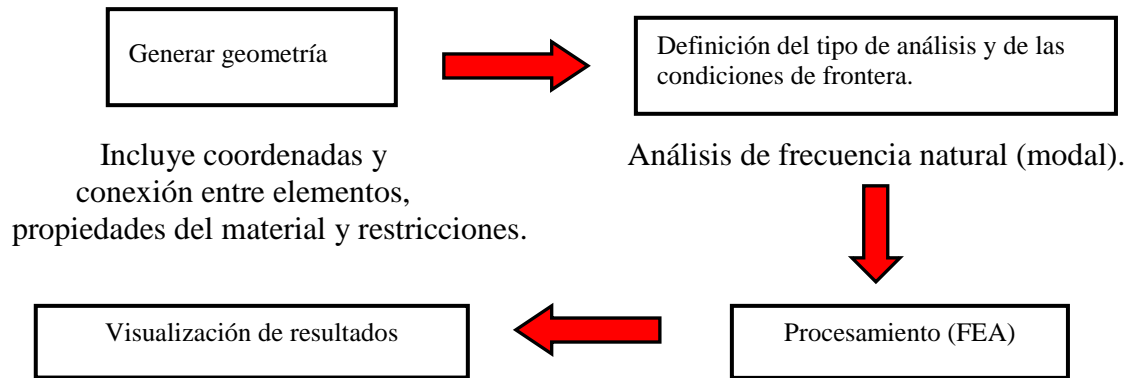


Figura 3- 29. a) Elemento Isoparamétrico, indicados con un cuadrado los puntos en los cuales se especifica gdl (nodos), indicados con un círculo los puntos en los cuales el software interpola. b) Malla (división del dominio) de estudio.

El procedimiento de simulación puede resumirse esquemáticamente en el siguiente modelo:



Se obtuvieron 15 modos naturales de vibración, obtenidos por simulación basada en las mediciones de los parámetros antes mencionados a sus correspondientes frecuencias. Esto es, en el rango que va desde los 700 Hz hasta los 6398 Hz. De estos 15 modos podemos observar en la figura 3-30 los modos de vibración para las frecuencias de 3690 Hz y 3707 Hz, muy cercanas entre sí. Comparativamente con los resultados obtenidos por holografía nos encontramos que ambas son similares en la distribución de los antinodos a los resultados obtenidos en el holograma de 3 mA mostrados en la figura 3-27 (a).

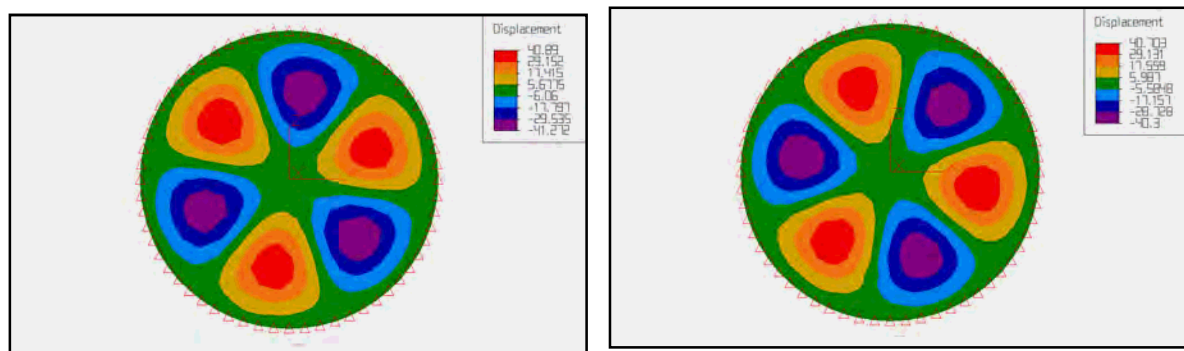


Figura 3- 30. Simulaciones resultantes de los modos naturales de vibración de la membrana elástica para frecuencias de 3690 Hz y 3707 Hz...

En la simulación de oscilación mediante MEF dentro del rango de frecuencia definido por el fabricante del buzzer, 4100 Hz nos encontramos que la membrana presentó un modo propio a 4344 Hz, levemente superior a la frecuencia de excitación. La respuesta a la frecuencia del buzzer es vista en el holograma de la figura 3-27(b) mientras que la simulación en su modo natural es mostrada en la figura 3-31(a).

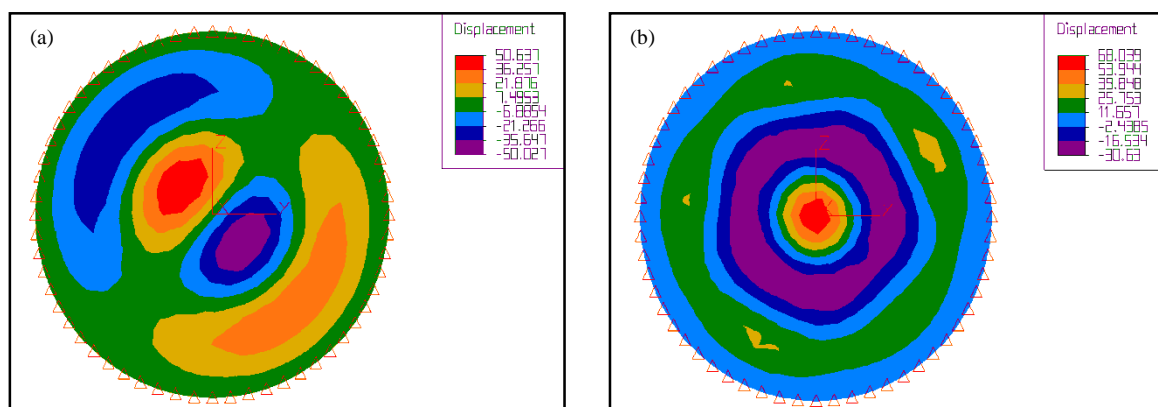


Figura 3- 31. (a) Simulación resultante de los modos naturales de vibración de la membrana elástica para frecuencia de 4344 Hz. (b) Frecuencia natural de resonancia a 6389 Hz.

Vemos que en el análisis comparativo de ambas figuras existen coincidencias en la parte central de la membrana.

Finalmente en la simulación de 6398 Hz, figura 3-32 (b) vemos que en la simulación resultante existen algunas coincidencias con la distribución de franjas mostrada en la figura 3-28 (b).

En el análisis comparativo queda sin contraparte la figura 3-28 (a) en la cual el holograma presenta dos antinodos. Sin embargo dado que los modos de vibración naturales, obtenidos por simulación, se presentan a valores discretos de frecuencias. Podría pensarse que el holograma obtenido para 8 mA fue una condición intermedia de frecuencia entre dos modos naturales de oscilación inducida por el buzzer.

2.1.2. Detección de grietas mediante inducción de ondas de sonido.

Para la detección de grietas fue reemplazada en el esquema anterior la membrana elástica, insertándose en su lugar una membrana de cartón. Esto se hizo con el fin de poder generar mediante un corte una pequeña grieta sobre la superficie. Dos hologramas de calibración fueron realizados, uno de ellos interferométrico, mostrados en la figura 3-32.

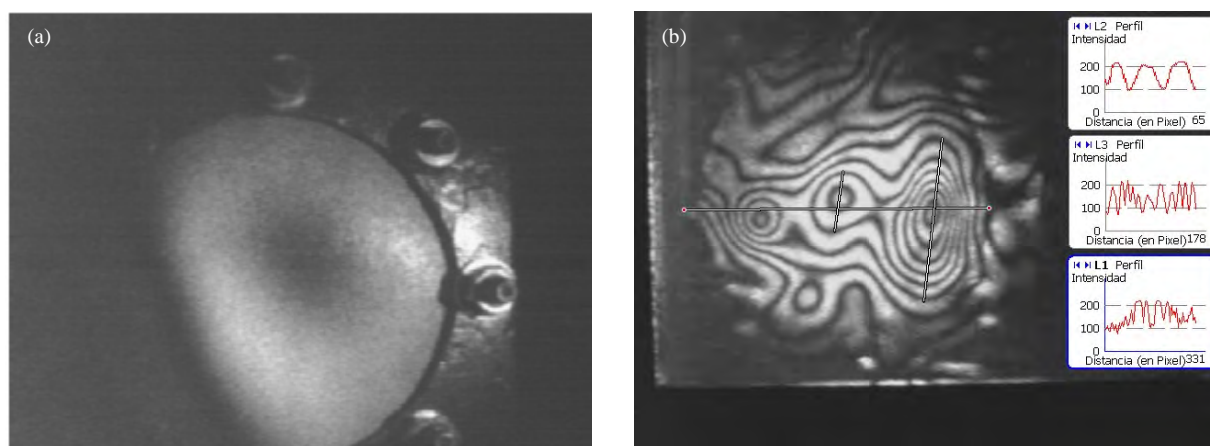


Figura 3- 32. (a) Holograma de referencia de la membrana, la membrana utilizada correspondiente a una lámina de cartón, similar desde el punto de vista mecánico con el material de soporte de pinturas. (b) Holograma interferométrico de la membrana de cartón oscilando a 4.2 KHz . El ángulo de observación es cercano al de iluminación por lo cual predominan las deformaciones en el sentido perpendicular. Claramente pueden observarse las zonas antinodales de la membrana.

En estos hologramas se buscó reconocer los patrones de interferencia que representaron la variación en la posición de la membrana de cartón, teniendo en cuenta que se trató de vibraciones que alcanzaron puntos de excursión máximos o mínimos constantes en el tiempo.

Los resultados del HI de la figura 3-32, difieren notablemente de los obtenidos para iguales condiciones sobre la membrana elástica.

Los dos hologramas mostrados en la figura 3-32, son solo dos de los 18 hologramas utilizados para evaluar la respuesta de la superficie de cartón. El conjunto de HI obtenidos, sirvió para definir el uso del buzzer como elemento excitador puntual.

Con el fin de observar cómo se comportaría una pieza que tuviese algún tipo de daño, desprendimiento o grieta, se procedió a realizar el marcado de la superficie de la membrana. Sin llegar a cortarlo totalmente, de esta forma se simuló una pequeña grieta en sentido vertical. Al excitar la pieza con el buzzer a su máxima intensidad nos encontramos con el resultado documentados en la figura 3-33 (a) y (b).

En estas últimas imágenes, puede verse claramente que la membrana ha quedado dividida en dos zonas perfectamente identificables, dado que a cada lado del corte es posible observar la formación de dos zonas antinodales. Además es notable ver las discontinuidades que se producen en las franjas a cada lado de la grieta. Evidentemente este método permite encontrar claramente donde se encuentra el daño en la superficie del objeto.

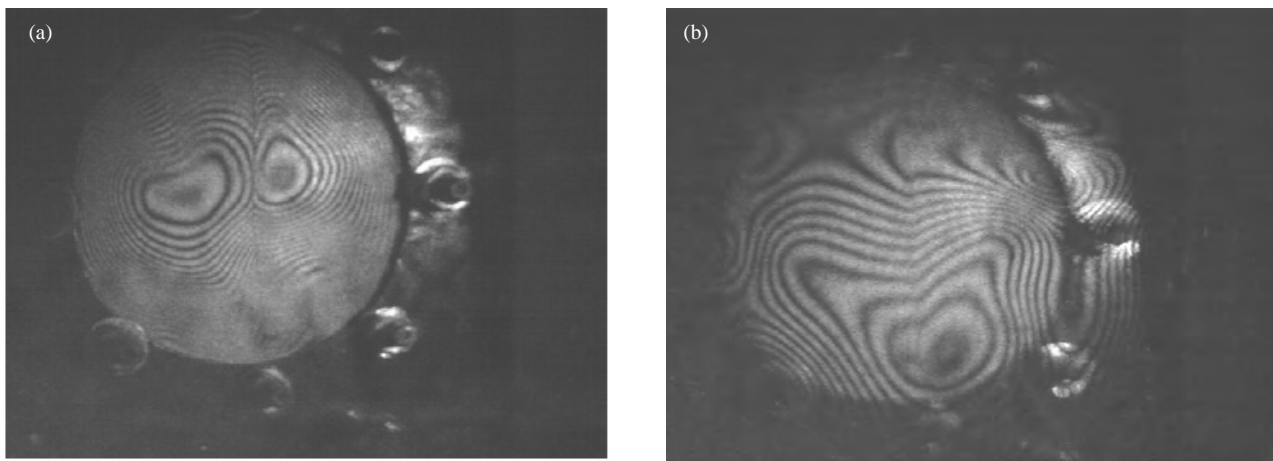


Figura 3- 33. (a) Holograma de la membrana luego de haberle efectuado un corte vertical deformación pura en z. (b) HI correspondiente a la misma membrana con una rotación en el ángulo de observación 22 °.

Inducción de las deformaciones por ondas de sonido sobre una obra de interes patrimonial.

Como objeto de estudio se usó un cuadro cuyo autor (Vercelli), lo habría pintado a fines de la década del 30 en la ciudad de Milán (Italia), lugar donde habría sido adquirida por el propietario.

La misma corresponde a la serie Pesche in Fiore (Durazneros en flor), pinturas al óleo, que el autor habría pintado en aquella década. Hoy las pinturas de esta serie son consideradas de un interés patrimonial medio.

La pintura analizada no presenta un estado de conservación aceptable, dado que fue posible observar como la polución se fue depositando sobre ella hasta cubrir en gran parte de los colores originales.

Dadas las características, se definió a esta como una pieza ideal para ser restaurada mediante un proceso de limpieza por láser, dado que de la simple observación no se encuentran zonas de desprendimientos o grietas.

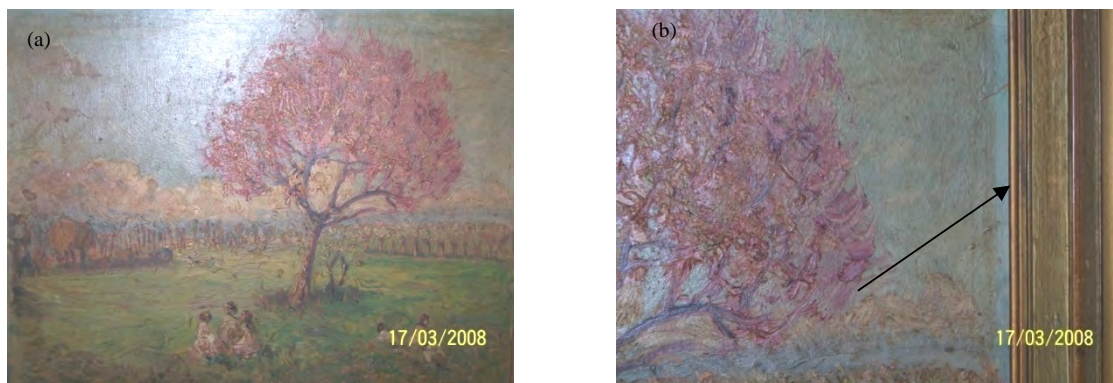


Figura 3- 34. (a) El óleo de Vercelli de la serie Pesche in Fiore. Nótese que el árbol ubicado en el centro de la escena es un duraznero florido típico de esta serie. (b) Detalle de la polución depositada sobre la pintura, desplazando levemente el marco es posible observar la diferencia de colores y la pátina depositada.

De toda la pintura fue seleccionada como área a ser analizada, una zona que presentaba una pincelada de mayor grosor que el resto. Dado que el material de soporte se encontraba construido con madera se supuso que dicha zona podría ser la más propensa a presentar algún tipo de deterioro. Una vez montado el cuadro en el sistema óptico se procedió con el montaje del buzzer en la parte posterior del cuadro.

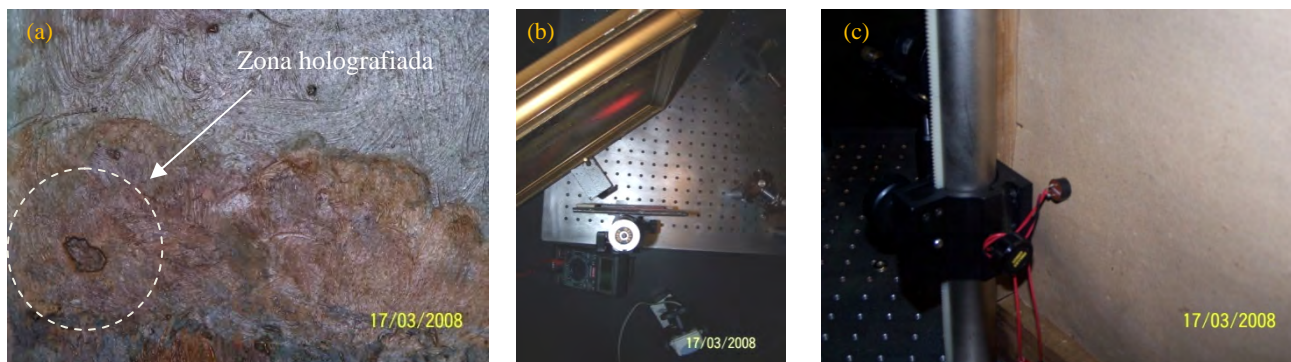


Figura 3- 35. (a) Zona de estudio, nótese la mayor deposición de pintura que hizo presuponer la posibilidad de existencia de desprendimientos o grietas. (b) Montaje del cuadro sobre la mesa óptica, vista superior usada para la determinación de los ángulos de observación e iluminación. (c) Detalle del montaje del buzzer en la parte posterior del cuadro.

Un total de 15 hologramas fueron realizados con el fin de estudiar del comportamiento del cuadro, bajo el efecto de la onda de presión generada por el buzzer. En todos los casos, los hologramas presentaron una muy mala calidad de imagen lo que llevó a revisar cada uno de los parámetros de la técnica holográfica. Luego de un exhaustivo análisis se interpretó que uno de los aspectos fundamentales, el cumplimiento de la relación de intensidades entre el haz de referencia y el haz del objeto, no se adecuaba a la relación 8:1 necesaria.

Posteriormente, se concluyó que la pintura al óleo o bien la película de polución depositada, podrían ser altamente absorbentes de la longitud de onda del láser de 632,8 nm, situación que puede ser observada en la figura 3-36. En esta, se ve a la pintura expuesta a la luz visible y la luz del láser. Si la luz del láser incidía directamente sobre la pintura no existía prácticamente luz reflejada, resaltándose solamente las pinceladas que tuvieran algún tono de rojo.



Figura 3- 36. Imágenes comparativas de la misma zona de la pintura, iluminada con luz natural y con luz del láser nótese la uniformidad en la luz reflejada por la pintura al ser iluminada por el láser.

De la serie de 15 hologramas, se pudieron obtener algunas imágenes para su estudio. A partir de estas pudo definirse el comportamiento de la zona bajo estudio ante la excitación localizada.

El holograma resultante, mostrado en la figura 3-37, permitió observar claramente que la zona de interés no presentaba ningún tipo de inconveniente en lo que respecta a la cohesión entre la pintura y la placa de madera. La existen dos zonas antinodales a cada lado de la pincelada y una franja circundante que rodea ambas zonas y bordea el material, pone en evidencia este hecho. Por otro parte fue posible observar que mientras los alrededores de la zona bajo estudio entraron en oscilación con la onda de sonido, el punto de interés presento una muy alta rigidez, indicativo de una buena cohesión a la madera de soporte.

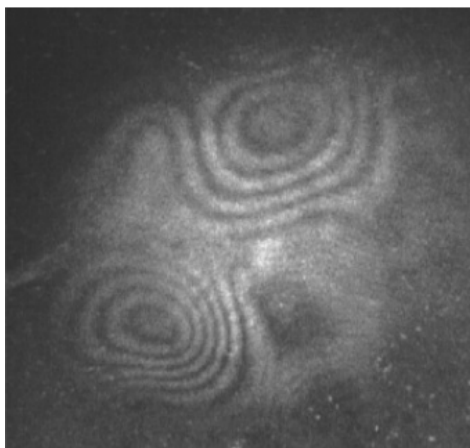


Figura 3- 37. HI de la zona bajo estudio en el cuadro de Verchelli, cuando se usa excitación acústica localizada.

3. Conclusiones.

Los resultados mostrados en este capítulo se corresponden a dos líneas de aplicación de la HI, discriminadas por el método de inducción de la deformación.

Cada una de las líneas de investigación tomó como punto de partida casos testigos asociados a un problemática particular para terminar siendo aplicados a problemas concretos.

Fundamentalmente se realizaron análisis cualitativos introduciéndose en algún caso la posibilidad de medición.

Del análisis cualitativo aplicado a las probetas resultantes de procesos de plaqueado por láser de potencia, se concluye que el comportamiento de las diferentes probetas de acero no fue en absoluto uniforme existiendo tensiones residuales que pudieron tener su origen en el proceso de laminación del perfil o derivadas de las altas temperaturas.

Por otra parte el análisis cualitativo no fue capaz por sí solo de dar explicación a la diferencia existente en el número de franjas esperadas y el número de franjas observado.

Un segundo análisis cualitativo fue realizado sobre partes E de núcleos magnéticos usados equipos auxiliares de iluminación. En este caso se evaluó el potencial del HI como método comparativo. Tres diferentes tipos de objeto fueron estudiados con el fin de detectar tensiones residuales. Partes E obtenidas de la línea de producción fueron comparadas con partes E cortadas con láser de CO₂. Finalmente se realizaron estudios comparativos con un tercer grupo de objetos, definidos como partes E cortadas con láser modificados en su forma. En este estudio la HI mostró todo su potencial permitiendo discriminar diferentes tipos de tensiones residuales y asociarlas a un posible origen.

La aplicación de simulaciones permitió dar una explicación a las diferencias entre las franjas existentes y las esperadas, cuando un análisis cuantitativo fue realizado sobre una de las probetas de acero AISI 304.

En todos los casos estudiados y en los cuales se registraron deformación fuera del plano, la HI no fue capaz de definir el sentido positivo o negativo de la deformación, constituyéndose como la principal limitación encontrada en este tipo de ensayo no destructivo.

Si la inducción de la deformación es de tipo dinámica, los análisis cualitativos resultan igualmente aplicables aportando información de iguales características. Como caso testigo se partió del estudio de las oscilaciones de una membrana vibrante, fenómeno muy conocido en física y documentado en todos los libros de física básica. Como elemento de inducción de las oscilaciones se utilizó un pequeño buzzer con el fin de evaluar la potencialidad de aplicación de deformaciones localizadas mediante ondas de sonido. En el caso testigo, la utilización de este dispositivo permitió observar modos de vibración sobre la membrana. Adicionalmente se utilizó el método de elementos finitos para simular el comportamiento de este objeto. Comparativamente se encontraron comportamientos equivalentes indicados por las simulaciones y los hologramas. Sin embargo la HI permitió la observación del comportamiento real de una membrana en condiciones no ideales. El mismo

esquema fue utilizado sobre una membrana de cartón sobre la cual previamente se le realizó un corte con el fin de simular una grieta. Nuevamente la HI mostro todo su potencial permitiendo individualizar sin lugar a dudas la ubicación de la grieta. La claridad de las franjas, su distribución y su discontinuidad en la zona del corte muestran la mayor concentración de información.

En general, el sonido se muestra como una variante más segura que la excitación térmica cuando los objetos tienen algún interés patrimonial.

Habiendo cuantificado y cualificado los efectos de la excitación localizada se aplicó este método en el análisis de una pintura de principios del siglo XX. Los resultados aquí obtenidos fueron limitados en particular por las dificultades encontradas en el proceso de análisis holográfico. De aquí se concluye, que la selección del láser usado no siempre es indiferente debiéndose prestar atención a la longitud de onda.

La HI ha resultado una herramienta de particular interés cuando se desean realizar análisis cualitativos, siendo un poco más compleja de ser aplicada en la cuantificación. Su principal ventaja radica sin lugar a dudas en la gran definición que se alcanza en el HI y el elevado nivel de contraste entre las franjas y el objeto.

El amplio campo de observación puede causar inconvenientes a la hora de interpretar las franjas resultantes, dado que su distribución parece cambiar en la medida que se cambia el ángulo de observación (figura 3-33). La utilización de un dispositivo como el mostrado en la figura 2-25, resuelve en gran medida este inconveniente.

Un segundo aspecto negativo de la HI radica en los tiempos necesarios para la obtención de resultados. Una parte importante del tiempo se pierde en la identificación de la magnitud de la deformación, requiriéndose una media de 5 hologramas de calibración por cada holograma de aplicación. Además, esto tiene aparejado un gran costo económico en película fotosensible y químicos para el procesamiento del film.

Capítulo IV: Resultados de holografía digital

A diferencia de la holografía convencional, donde los modelos ópticos generales son fácilmente adaptables para su aplicación, en holografía digital intervienen toda una serie de variables que deben ser acotadas. Así, si bien en la mayor parte de la documentación existente se indica al esquema de Fourier sin lentes como el método por excelencia, su implementación difiere según las condiciones y equipamientos disponibles en cada laboratorio.

El desarrollo de un sistema de holografía digital, desde su algoritmo a su esquema óptico, implica en todos los casos un aporte al conocimiento, debiéndose justificar los resultados relacionados con el sistema seleccionado.

En este capítulo se detallan los pasos seguidos para la obtención de un sistema óptico generado para su posterior utilización en interferometría holográfica digital. Además, se muestran la evolución del sistema y del algoritmo utilizado, documentándose cada una de las situaciones particulares y las soluciones aportadas.

Mucha de la información aquí presentada, es en gran medida, ampliatoria de lo indicado en la bibliografía de referencia, en la cual no es posible encontrar justificación de algunos de los resultados obtenidos en la implementación del sistema.

1. Resultados de la aplicación diseño del esquema óptico alternativo.

En el Capítulo II se indicó como alternativa al sistema óptico del holograma de Fourier sin lentes, el esquema indicado en la figura 2-33. Además, se realizaron cálculos estimativos de las condiciones de montaje en función del tamaño del objeto. A partir de estos datos se procedió con la realización de diferentes hologramas sobre diferentes objetos.

De los resultados obtenidos, encontramos una serie aspectos negativos dependientes tanto del algoritmo de reconstrucción como del esquema óptico utilizado. Estos, pueden ser clasificados en lista siguiente:

- Bajo nivel de contraste de la imagen del objeto.
- Visualización de la imagen real y virtual sobre el mismo plano.
- Imágenes múltiples, bajo nivel de selectividad espacial.
- Aumento lateral de la imagen.
- Ubicación de la imagen dependiente de la posición del objeto.
- Alto nivel de ruido speckle.

En la bibliografía de referencia [Schnars, 2005], [Kreis, 2004] es posible encontrar información sobre el origen de alguno de estos inconvenientes así como también propuestas de soluciones, tomándose a estas como punto inicial para la optimización de los resultados. Así, se trabajó sobre el montaje óptico, pero además se realizaron pruebas y modificaciones sobre el algoritmo de reconstrucción con el objetivo de mejorar las imágenes de amplitud.

2. Soluciones aportadas para el mejoramiento del sistema óptico y el algoritmo de procesamiento.

2.1. Eliminación del término de continua.

Las imágenes holográficas obedecen a un modelo matemático de Fourier. La reconstrucción de una señal particular (el holograma) por el método de Fourier implica la existencia de una sumatoria de

términos de diferentes órdenes (gemelos). Además de estos términos existe la componente de continua, definida como orden cero. En holografía, el término de continua se genera a partir del haz de referencia que no es difractado por el holograma durante la reconstrucción. En holografía digital ocurre esto de igual manera, por lo cual es necesario eliminarlo para obtener una buena definición en la imagen reconstruida.

La interferencia, durante la construcción del holograma, obedece a la ecuación (2-4) del Capítulo II, donde los dos primeros términos corresponden al término de continua. En holografía convencional I_o e I_r , presentan relaciones dispares de magnitud, por lo cual predomina la intensidad del haz de referencia. Por el contrario, en holografía digital, ambos términos deben ser ecualizados. Posteriormente a la toma de la imagen, la matriz resultante presenta una distribución de intensidades medias que responde píxel a píxel a la siguiente ecuación:

$$I_m = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} I(k\Delta x, l\Delta y) \quad \text{Ec. 4-1}$$

El término de continua se presenta, en los hologramas digitales, como una zona iluminada en el centro de la imagen. Esta zona, normalmente de forma cuadrada, reproduce una distribución geométrica similar a la forma del CCD [Schnars, 2005] y se solapa con los primeros órdenes de difracción. Por lo tanto, en la reconstrucción se deberá introducir en el algoritmo una operación que elimine los dos primeros términos de la ecuación (2-4).

De acuerdo con la bibliografía de referencia [Schnars, 2005] la forma de eliminar éste término es mediante la substracción elemento a elemento de la matriz del holograma con el valor medio discreto de intensidad obtenido de la ecuación (4-1).

$$I'(k\Delta x, l\Delta y) = I(k\Delta x, l\Delta y) - I_m(k\Delta x, l\Delta y) \quad \text{Ec. 4-2}$$

Para $k = 0, 1, 2, \dots, N$ y $l = 0, 1, 2, \dots, N$

Así la matriz del holograma I' generaría una imagen libre del termino de continua, visualizándose como un holograma sin un cuadrado brillante en el centro de la imagen reconstruida.

Prácticamente, la supresión del término de continua se realiza mediante una operación en Matlab® de una sola línea que reproduce la sustracción de la ecuación (4-2), donde el valor medio es calculado por una función de este programa.

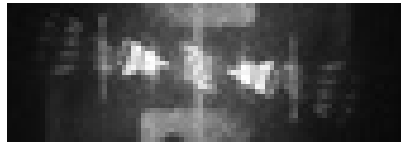


Figura 4- 1. Detalle de la imagen central de difracción.

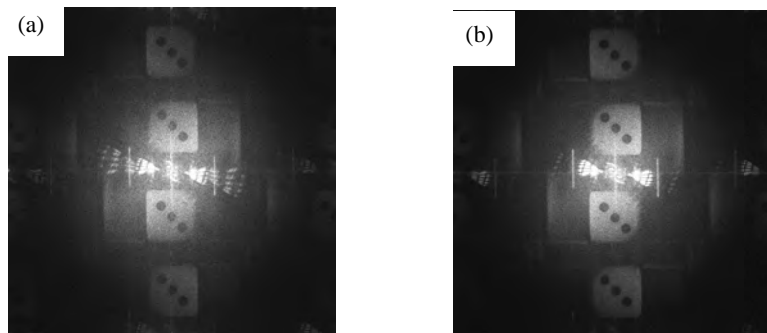


Figura 4- 2.Reproducción de la misma imagen (a) sin el algoritmo de eliminación del término de continua, (b) con algoritmo de supresión.

Evidentemente esta operación resulta de muy fácil implementación. En el sistema adoptado, con el uso de la Moticam 3000®, no solo encontramos la presencia del término de continua. Además es posible visualizar una figura de difracción en forma de alas que se desarrolla horizontalmente en cada una de las imágenes reconstruidas (figuras 4-1 y 4-2). Esta imagen no solo obedece al término de continua, es probable que debido a los filtros IR que posee la cámara estas alas respondan a una estructura de interferencia particular, la cual solo podría ser eliminada mediante el despiece de la cámara.

En la figura 4-2, puede observarse la misma imagen reconstruida con y sin la operación de supresión del término de continua.

De la comparación directa de ambas imágenes puede verse que el término de continua se ve notablemente atenuado, pero al mismo tiempo las figuras en forma de alas se ven magnificadas. Si se observa en detalle se puede ver que esta última estructura se presenta también en los órdenes superiores, lo que indica que forma parte de la imagen holográfica, resultado de los filtros IR presentes en la cámara. Sin embargo el término de continua no es totalmente eliminado, tal como se sugiere en la bibliografía [Kreiss, 1997].

2.2. Solución al bajo nivel de contraste.

Mediante corrección del sistema óptico.

El nivel de contraste de la imagen resultante es dependiente de una serie de factores tanto ópticos como de procesamiento. Desde el punto de vista óptico, el contraste de la imagen es dependiente fundamentalmente de la relación de los haces de referencia y del objeto. Si el haz de referencia es de un nivel de intensidad mayor al del objeto nos encontramos con una imagen oscura y de bajo contraste [Schnars, 2005].

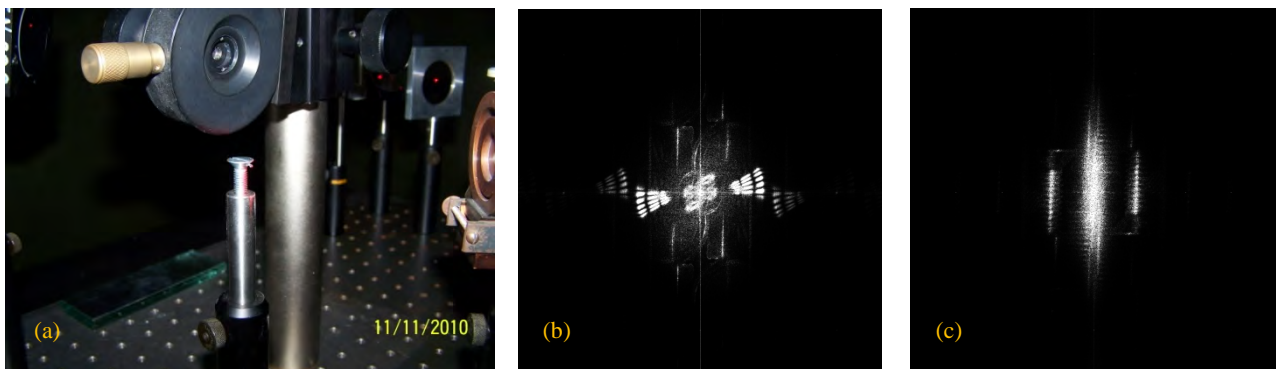


Figura 4- 3. (a) Objeto utilizado: tornillo metálico roscado sobre columna de soporte, (b) holograma de bajo contraste con A_0 predominante e imágenes múltiples. (c) imagen compensada ópticamente.

Para lograr la compensación de la imagen, mejorando el contraste, inicialmente se utilizaron divisores de haz y filtros atenuadores. Estos, fueron aplicados sobre el haz de referencia para conseguir diferentes niveles en su intensidad. De esta forma se obtuvo algún grado de mejora del contraste, pero con la dificultad de tener que reemplazar diferentes tipos de filtros en función de la reflectividad del objeto.

Posteriormente se utilizaron un par de polarizadores montados en soportes que permiten el giro o rotación de manera de definir el nivel de intensidad del haz de referencia en función de los ángulos relativos entre el polarizador y el analizador. Con este tipo de compensación la mejora lograda fue notable en lo que respecta al nivel de definición de la imagen de amplitud. Como ejemplo, se muestra en la figura 4-3 el efecto de mejora del contraste utilizando como objeto un tornillo de cabeza fresada, de tipo galvanizado, con un alto nivel de reflexión difusa. Con el fin de eliminar cualquier posibilidad de inestabilidad del sistema, el tornillo se lo roscó sobre una columna de montaje óptico en el mismo plano del filtro espacial correspondiente al haz de referencia, figura 4-

3(a). La figura 4-3(b) y 4-3(c) muestran la imagen registrada sin atenuador y con el valor ajustado del atenuador para conseguir una intensidad de los dos haces similar.

Los niveles de intensidades finalmente proveniente de cada uno de los haces se calibra usando la cámara de CCD. Para esto se obtura el haz de referencia y se observa la intensidad de luz dispersada por el objeto. Posteriormente se libera el haz de referencia y se observa que la superposición de zonas iluminadas sobre la pantalla y proveniente del CCD se encuentren en un mismo nivel. Esto puede ser corroborado mediante la utilización de un perfil de intensidades de cada haz, sin embargo luego de realizar sucesivas pruebas la sola observación resulta suficiente para la determinación de la equidad entre las intensidades.

Mediante optimización del algoritmo de reconstrucción.

Un segundo aspecto considerado para mejorar la definición del contraste de la imagen, fue la compensación que puede ser realizada mediante el procesamiento de la imagen reconstruida mediante la compensación γ (Gamma). Esta forma de compensación tiene su origen en la fotografía convencional siendo posteriormente adaptada a las imágenes digitalizadas. De acuerdo con lo enunciado por Zaldivar, Cuevas y Pérez [Cuevas, 2010], la corrección gamma es una operación de píxel que permite compensar las diferentes características de captación y despliegue de imágenes mediante la utilización de un espacio general de intensidades. La función gamma puede definirse como:

$$b = f_{\gamma}(a) = a^{\gamma} \text{ con } \gamma > 0$$

En Matlab[®] esta operación se realiza mediante una sentencia en la cual es posible definir el valor de γ . Si este es 1 la matriz resultado de la operación es la misma no alterándose su contenido. Si es menor a 1 entonces la imagen tiende a mejorar el brillo y si es mayor a 1 resultará en una imagen más oscura, tal como se muestra en la figura 4-4.

La variación de contraste resulta ser un parámetro importante, no documentado por los diferentes autores, cuando se desea lograr una buena definición de la imagen de amplitud.

2.3. Formación de imágenes múltiples.

Tal como se describió en el marco teórico, la transformada de Fourier introduce a la imagen en el dominio transformado de frecuencia, en este caso de frecuencia espacial. Como consecuencia de esto es inevitable la existencia de una secuencia de armónicos de órdenes superiores en la formación de la imagen. Si sumamos a esto un medio de registro de baja selectividad espacial como lo es una cámara de CCD, entonces deberemos prestar mucha atención al esquema óptico que se usará.

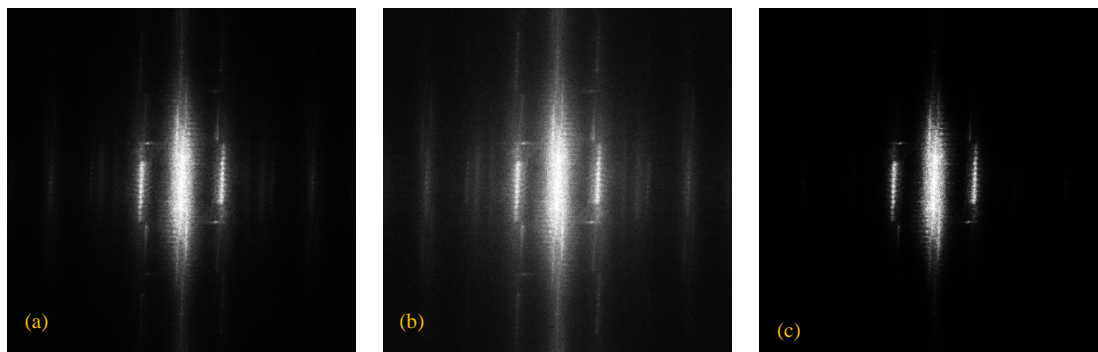


Figura 4- 4.(a) Reproducción de la imagen con un coeficiente $\gamma = 1$. (b) Reproducción de la imagen con un coeficiente $\gamma = 0,6$. (c) Reproducción de la imagen con un coeficiente $\gamma = 2$.

El esquema en línea y sin lentes presenta una muy baja posibilidad de eliminar los armónicos de orden superior, aplicando herramientas ópticas, dado que un ángulo de 8° como el usado en el

esquema de la figura 2-31 resulta grande para las dimensiones de los píxeles de la cámara. En la bibliografía de referencia, las imágenes de primer orden que se forman a cada lado del término de continua reciben el nombre de gemelos [Schnars, 2005], [McElhinney, 2008].

De diferentes y sucesivos ensayos realizados, nos encontramos con la existencia de estas imágenes múltiples. La posición de las mismas sobre la imagen reconstruida presentaba una dependencia entre la posición del objeto y la posición del filtro espacial del haz de referencia. Por otra parte y de acuerdo con el nivel de γ usado en la reconstrucción de la imagen, podían observarse un número mayor o menor de imágenes armónicas.

Para poder establecer una relación entre el sistema y las imágenes se definieron una serie de hipótesis de trabajo.

- La posición de los gemelos depende la posición relativa entre el haz de referencia y el objeto.
- La cantidad de gemelos depende de la posición relativa de la cámara y el haz de referencia.
- La cantidad de gemelos es dependiente del nivel de contraste de la imagen reconstruida.

En ningún caso fue posible definir a partir de la recopilación bibliografía solución a estas hipótesis, no encontrándose mención alguna referente a esta problemática. Es de suponer que la implementación de un sistema óptico diferente, como lo es el propuesto, implica la aparición de situaciones no informadas precedentemente.

Relación entre la posición del objeto y el haz de referencia.

Para poder determinar la existencia de una relación entre estas dos variables con la posición de la imagen reconstruida se montó un sistema óptico en el cual se pudiera cambiar la ubicación del objeto en su plano. Las coordenadas (x,y) del objeto quedaron definidas en un sistema con centro en la salida del filtro espacial y dejando fija $(z,)$, como lo muestra la figura 4-5. De esta manera, sobre el eje z quedó definida la distancia d_{min} (separación entre el objeto y la cámara) determinada mediante la ecuación 2-34, que en este caso correspondió a una distancia de 30 cm usándose una cámara de 5 Mpx. El ángulo del filtro espacial se fijó en 8° respecto de la horizontal definida por el plano de la mesa holográfica.

En estas condiciones se obtiene una fotografía digital del objeto en cada posición deseada, desde la posición de la cámara, utilizando para ello la lente de enfoque variable. La fotografía así obtenida es puesta en escala mediante el sistema de referencias que posee el software Motic Image Plus[®]. Como referencia de distancia para el escalado de las imágenes se usa la dimensión conocida del dado usado como objeto y que son fácilmente medibles. Finalmente, la lente de enfoque es retirada y se procede con la obtención del holograma. Nuevamente, sobre la imagen holográfica reconstruida, se realiza la puesta en escala midiéndose la distancia entre un punto definido del objeto y el centro de la imagen, tal como lo muestra la figura 4-5 (b).

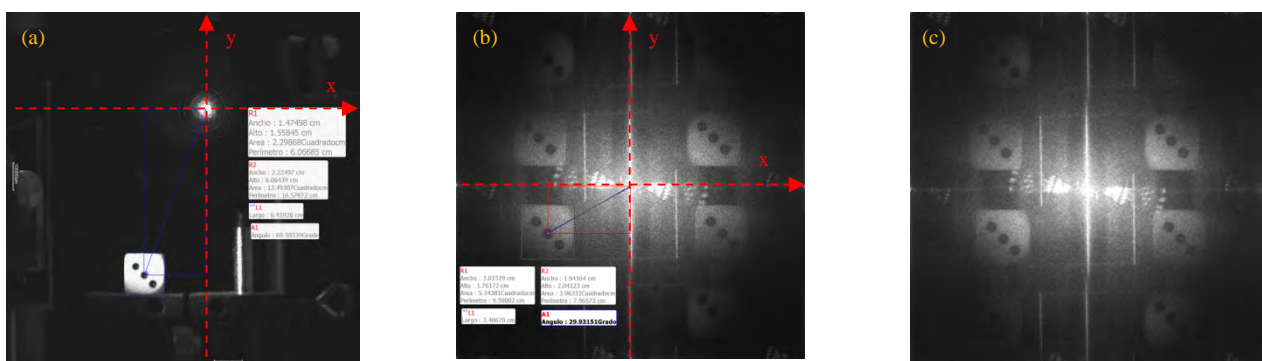


Figura 4- 5. Ejemplo de toma de imágenes y mediciones para su correspondiente medición de coordenadas (a) Medición de la distancia Objeto – centro del haz de referencia, (b) Medición de la distancia imagen al centro de la imagen. (c) Imagen resultante.

Inicialmente se realizaron ensayos sucesivos en la dirección de desplazamiento y (desplazamiento vertical en el plano del objeto). Para cada posición adoptada, se documentaron las distancias antes definidas y los resultados fueron tabulados.

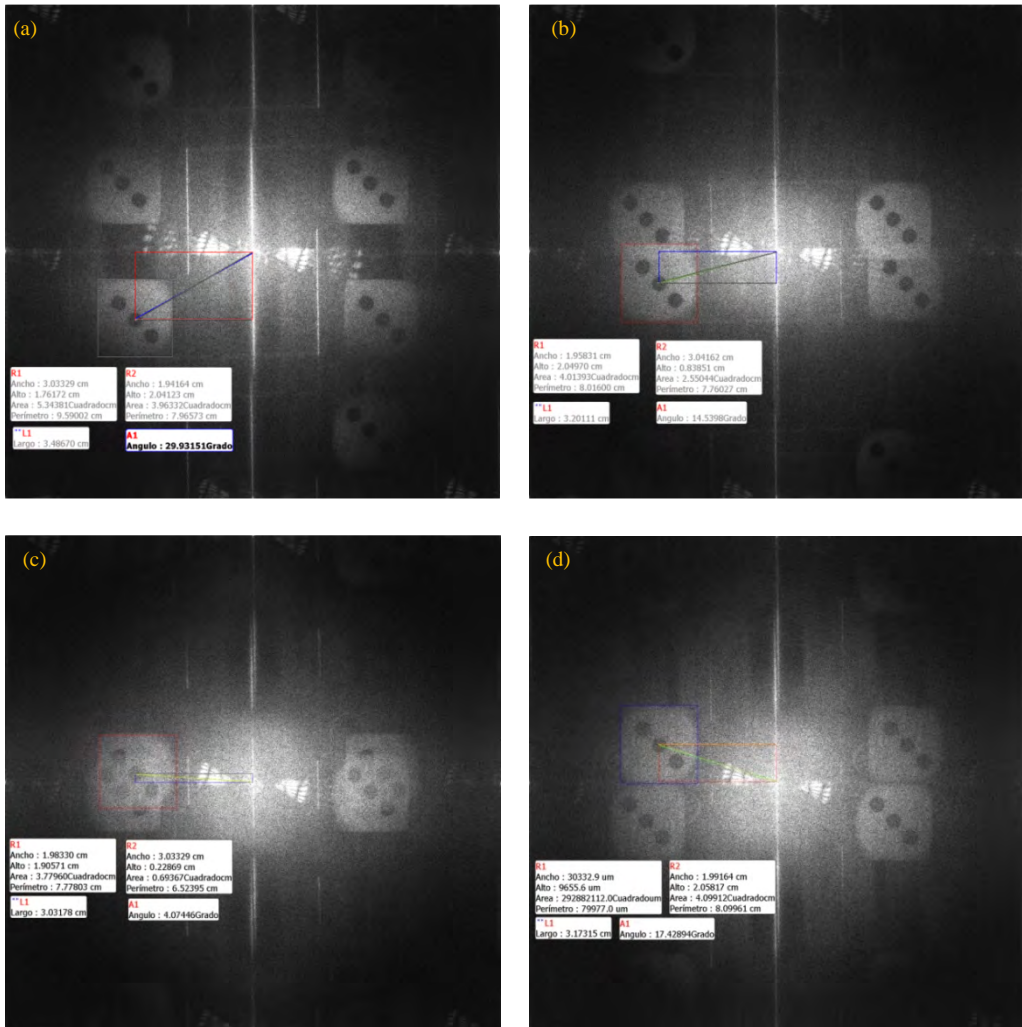


Figura 4- 6. (a) Posición inicial (d) Posición final, desplazamiento del objeto vertical en dirección: acercandose al centro del haz de referencia.

Tabla 4-1. Datos documentados de posiciones relativas en cada sistema de coordenadas, plano del objeto y plano de la imagen. (Coordenada y)

Datos obtenidos de las fotografías						Datos obtenidos de los hologramas					
Holograma	Distancia x	Distancia Y	Radio	Ángulo	Tamaño	Distancia x	Distancia Y	Radio	Ángulo	Tamaño	Gemelos
Holograma 11	2,21	3,98	4,53	60	1,55	3,03	-0,96	3,17	-17	1,99	4
Holograma 10	2,19	4,53	5,01	63,8	1,55	3,03	-0,22	3,36	-4,07	1,99	4
Holograma 9	2,2	5,43	5,8	67,5	1,55	3,04	0,84	3,48	14	2	6
Holograma 8	2,22	6,41	6,4	69,6	1,55	3,03	1,76	3,48	29	2	5
Unidades	cm	cm	cm	°	cm	cm	cm	cm	°	cm	

Luego de la reconstrucción del holograma, se realizaron las mediciones correspondientes relacionándolas con los valores obtenidos del esquema.

Una secuencia correspondiente a las imágenes reconstruidas para cada uno de las posiciones adoptadas, se encuentran documentadas en la figura 4-6. De la observación de la secuencia de hologramas, es evidente que en la medida que el objeto se desplaza hacia arriba, la imagen también lo hace llegando a un punto en el cual estas se superponen y posteriormente se invierten. En la segunda secuencia, se procedió de igual forma pero variando la posición de la coordenada x en el

plano del objeto. Nuevamente se tomó como referencia el tercer cuadrante considerando el punto de origen del sistema de coordenadas el centro del haz de referencia.
 Nuevamente, los resultados indican un desplazamiento en igual sentido al de crecimiento y superado un determinado valor se produce el cambio de cuadrante.

Tabla 4-2. Datos documentados de posiciones relativas en cada sistema de coordenadas, plano del objeto y plano de la imagen.

Datos obtenidos de las fotografías						Datos obtenidos de los hologramas					
Holograma	Distancia x	Distancia Y	Radio	Ángulo	Tamaño	Distancia x	Distancia Y	Radio	Ángulo	Tamaño	Gemelos
Holograma 12	3,09	6,08	6,83	62,5	1,55	4,2	1,83	4,4	22,82	1,99	6
Holograma 13	2,03	6,08	6,33	71	1,55	2,87	1,78	3,37	31,42	2	6
Holograma 14	1,5	5,98	6,16	75,6	1,55	2,1	1,76	2,72	39,5	2	6
Holograma 15	0,87	5,99	6	81	1,55	1,2	1,8	2,14	55,64	2	4
Holograma 16	0	5,96	5,96	90	1,55	0	1,79	1,79	90	2	4
Unidades	cm	cm	cm	°	cm	cm	cm	cm	°	cm	

Con el fin de encontrar una relación que sea capaz de definir las coordenadas de la imagen en función de la ubicación del objeto, se realizaron gráficos en sistemas cartesianos y se definieron las ecuaciones de aproximación numérica.

Las ecuaciones de transformación propuestas pueden resumirse como:

$$y' = 1,12y - 5,33$$

$$x' = 1,42x$$

Ec. 4-3



Figura 4- 7. (a) Posición inicial (d) Posición final, desplazamiento del objeto horizontal en dirección: acercándose al centro del haz de referencia.

De los gráficos obtenidos (figura 4-8) claramente se puede concluir que existe una transformación lineal entre las coordenadas del objeto y las coordenadas de la imagen. Así definiendo la posición del objeto en el sistema de coordenadas fijo en el origen del haz de referencia e independientemente de la posición de la cámara en su plano (η', ξ'), es posible predecir la posición de las imágenes respecto del término de continua ubicado siempre en el centro del holograma digital.

Solución al problema de los gemelos mediante el cálculo de la posición del objeto.

Los gemelos, tal como lo definimos anteriormente, corresponden a diferentes órdenes de los términos del desarrollo de Fourier, así si observamos seis gemelos estaríamos viendo las imágenes, correspondientes a las intensidades de hasta el tercer orden de acuerdo con la ecuación 2-32. Órdenes superiores resultarían notablemente atenuados en su intensidad dado el factor exponencial. De acuerdo con la posición del objeto vemos que los gemelos tienden a ubicarse más cerca o más lejos del término de continua (ubicado en el centro de la imagen). Si como en el caso del holograma (d) de la figura 4-6 la coordenada x es cero, entonces la posición de los armónicos espaciales se alinea con el término de continua. Si variamos la posición de la coordenada y del objeto entonces podríamos eliminar el segundo orden. Un planteo similar podría realizarse para la coordenada y respecto de la x .

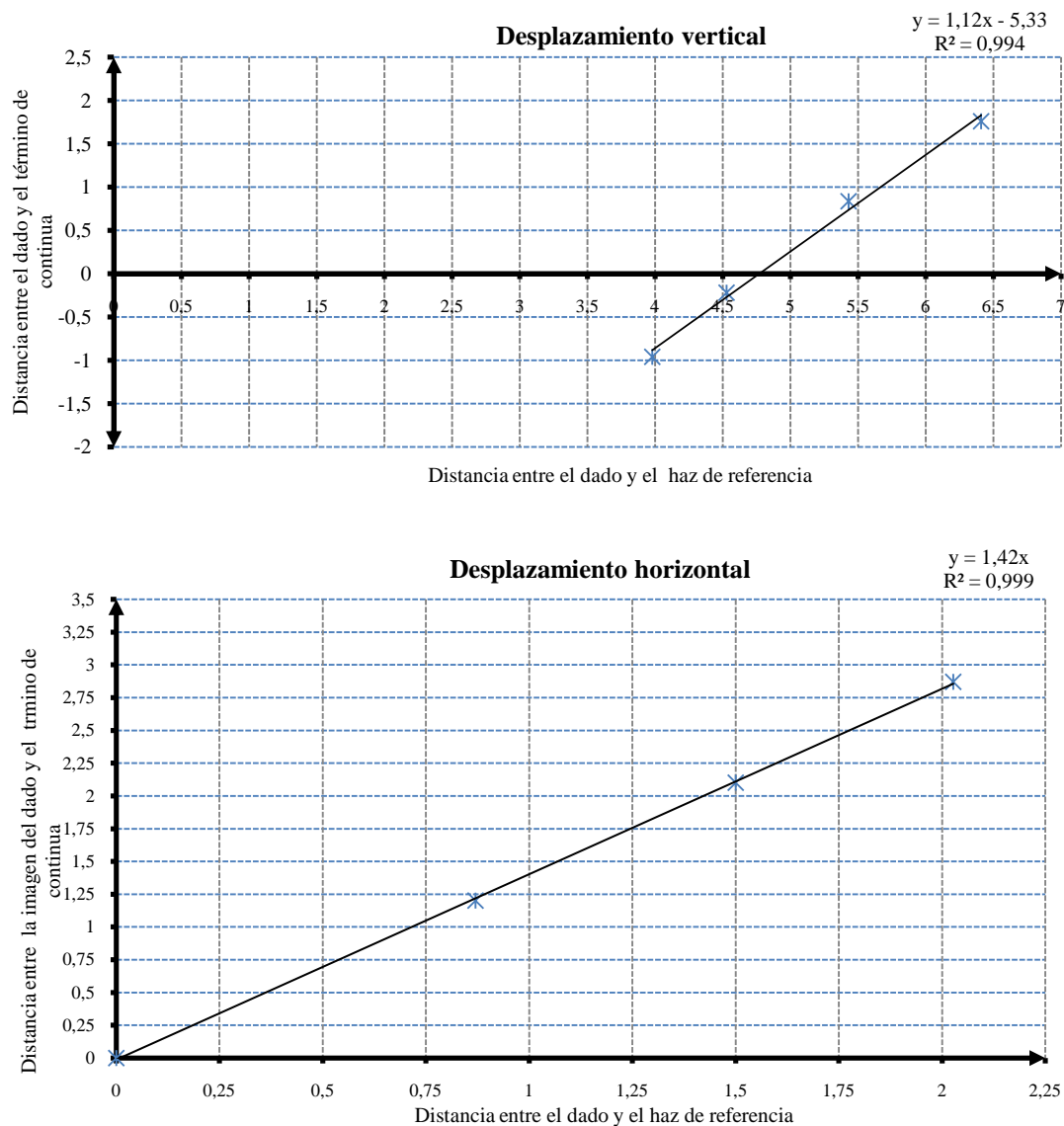


Figura 4- 8. Relaciones funcionales entre la posición de la imagen respecto del centro del holograma y del objeto respecto del centro del haz de referencia.

Es evidente que si nos posicionamos correctamente con el objeto en coordenadas (x,y) predefinidas a partir de las ecuaciones 4-3, las imágenes de primer orden se ubicarán lejos del término de continua y los términos de orden mayor se separarán en igual medida quedando fuera del alcance de las dimensiones de la matriz imagen. Por el contrario, si la distancia entre el término de continua y el primer armónico es pequeña o existe superposición, los armónicos de órdenes superiores tenderán a superponerse con las imágenes de primer orden. Así, para permitir únicamente la formación de las imágenes virtual y real se deberá calcular la posición del objeto de manera que la imagen real se ubique en el centro del segundo cuadrante del sistema de referencia aplicado al holograma. Debe quedar claro que las ecuaciones 4-3 relacionan la posición del objeto y las imágenes para este esquema en particular (figura 2-31), cualquier cambio en el ángulo de inclinación del filtro espacial o de la distancia d_{\min} introducirá cambios en la posición final de la imagen. Así, previamente a la aplicación de un esquema es conveniente repetir la operatoria, definir las ecuaciones de transformación y luego operar. Sin embargo, en la práctica la posición del objeto se va convirtiendo en una tarea intuitiva para el operador, el cual con cierta experiencia ubicará rápidamente el objeto en la posición más adecuada.

Solución al problema de los gemelos mediante el ajuste de γ .

Si bien hemos establecido una relación entre los gemelos y la posición no hemos establecido una relación entre la cantidad de gemelos y el tamaño del objeto (el tamaño del objeto define d_{\min}) es de esperarse que cuanto más pequeño sea el objeto más órdenes de difracción puedan superponerse [Schnars, 2005]. Si consideramos una distribución espectral mediante un diagrama de Fourier, vemos que las amplitudes de los armónicos son decrecientes y por lo tanto trabajando sobre el coeficiente de contraste se podrían reducir la visibilidad de estos.

En la figura 4-9 se muestra el resultado de trabajar sobre esta variable.

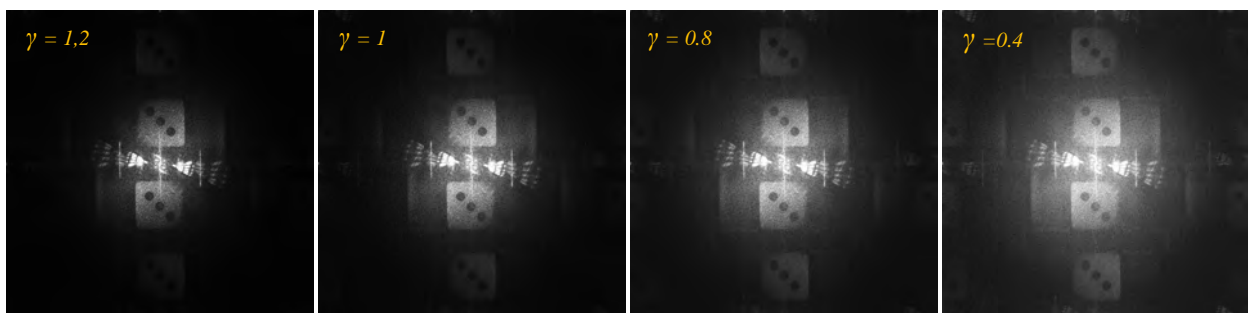


Figura 4- 9. Secuencia de hologramas reconstruidos con diferentes valores del término exponencial, en la rutina de reconstrucción de imágenes.

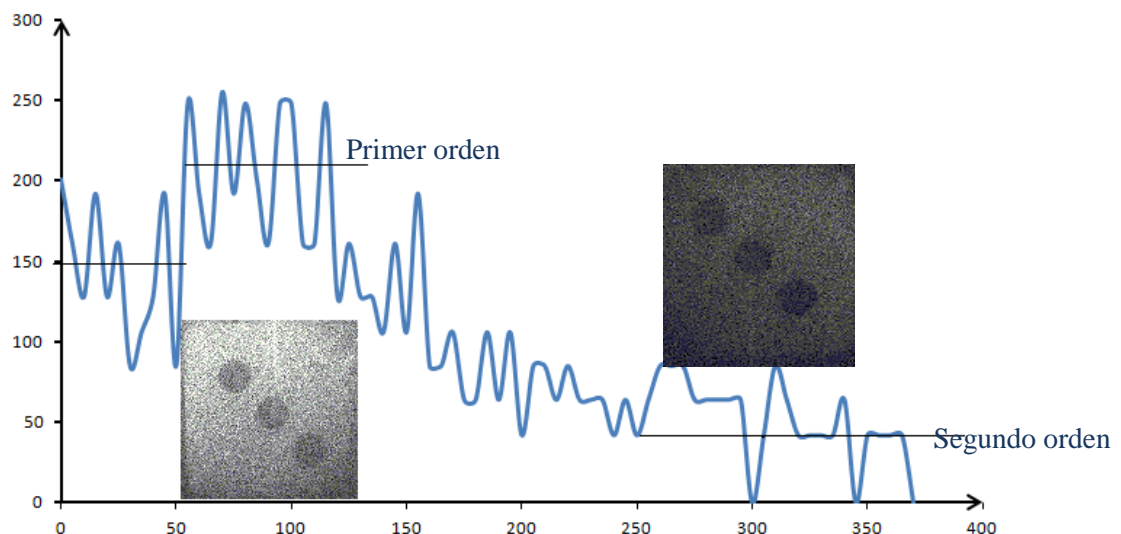


Figura 4- 10. Perfil de intensidades correspondientes a la imagen $K=0.4$. Trazado vertical desde el DC hasta el extremo superior $\Delta = 1/10$ px.

Así y como se lo muestra en las figura 4-9, un método para la eliminación de los términos de orden superior es reducir el nivel de contraste de la imagen resultante. Sin embargo, esto también produce la reducción del término de primer orden.

2.4. Superposición de la imagen real y virtual

Un segundo inconveniente derivado de la aplicación de esquema óptico es la coexistencia de la imagen real y virtual sobre el mismo plano como caso particular del punto anterior. Esto produce que ambas se encuentren en foco durante la reproducción. En el esquema en línea de Gabor, con ángulo cero entre el haz de referencia y el del objeto la imagen virtual normalmente se encuentra fuera del plano focal y por lo tanto solo se visualiza como una sombra más o menos difusa en posición contrapuesta a la imagen real.

En la imagen (c) de la figura 4-3 puede verse claramente la formación de ambas imágenes. La consecuencia indeseada, es la posibilidad de superposición entre ellas, tal como se muestra en la figura 4-11 (a).

Operando como se describió anteriormente es posible reubicar el objeto de tal manera que su imagen real se ubique en el segundo cuadrante, alejada del término de continua y del armónico de segundo orden. Así el holograma de la figura 4-11 (a), puede ser capturado corrigiendo la posición del objeto de manera que la imagen resulte en la posición del holograma de la figura 4-7 (a), donde en el segundo cuadrante solo se observa la imagen real.

Lograda la separación de las imágenes es posible realizar el recorte de la matriz resultante mediante un algoritmo de procesamiento tal como lo sugieren diferentes autores [Schnars, 2005] [McElhinney, 2008] [Kreis, 2004].

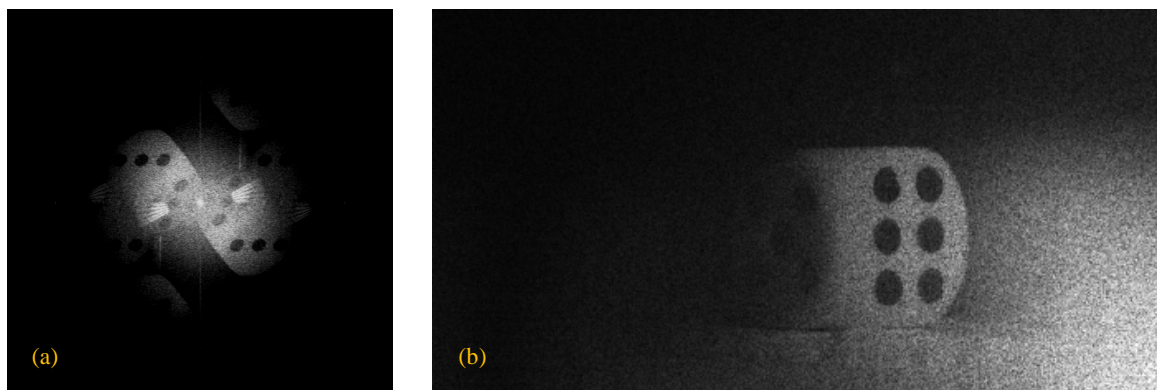


Figura 4- 11. (a) Superposición de la imagen real y virtual en un holograma en línea de Gabor. (b) Recorte del cuadrante correspondiente a la imagen real de un holograma en el cual se calculó la posición deseada de la imagen mediante las ecuaciones 4-3. Posteriormente se procedió con la selección y recorte de la imagen final representada aquí.

2.5. Alto nivel de ruido speckle.

En todas las imágenes mostradas hasta el momento es posible apreciar un alto nivel de ruido speckle, el cual se encuentra sobre toda la superficie de la imagen reconstruida. Si solo se tomara el haz de referencia sin la incidencia del haz del objeto nos encontraríamos con un patrón predominante de speckle aleatorio causado por la incidencia del haz sobre el CCD. Así la misma superficie de este elemento actúa como generador de ruido speckle predominando sobre la información. La eliminación de este solo queda acotada a aplicación de técnicas equivalentes a la eliminación de ruido blanco en la teoría de la comunicación. El efecto de este ruido puede distinguirse claramente en la figura 4-10 correspondiente al perfilado de la imagen de un holograma, la existencia de esta forma de perturbación genera valores de intensidad por encima y por debajo del valor medio de la intensidad correspondiente a la información (dado).

3. Mejoramiento de la imagen de amplitud.

Implementación de filtros digitales para el mejoramiento de la imagen de amplitud.

Las técnicas de procesamiento digital de imágenes permiten mejorar la calidad de una imagen a partir de la implementación de diferentes tipos de filtros. Básicamente los filtros son algoritmos que buscan suavizar los cambios abruptos de intensidad entre píxeles. Así un filtro realizará una operación matemática relacionando un píxel particular con aquellos que los circunscriben. Una expresión matemática general puede ser enunciada a partir de la ecuación 4-4.

$$I'(x, y) = \frac{1}{r^2} \sum_{j=-r}^r \sum_{i=-r}^r I(x + j, y + i) \quad \text{Ec. 4-4}$$

Donde r representa la denominada región que resulta ser la zona afectada por la aplicación del filtro. Si r es 3 entonces la zona afectada será la de los 8 píxeles que rodean al píxel sobre el que se aplica el filtro.

$I(x-1, y-1)$	$I(x, y-1)$	$I(x+1, y-1)$
$I(x, y-1)$	$I(x, y)$	$I(x+1, y)$
$I(x-1, y+1)$	$I(x, y+1)$	$I(x+1, y+1)$

La matriz resultante bien puede ser definida en forma de tabla tal como se muestra en el ejemplo anterior. No todos los filtros contemplan linealidad entre los píxeles o una distribución cuadrada de la región. Es posible asignar diferentes tipos de pesos a cada píxel o bien regiones de diferentes morfologías. Sin embargo siempre resulta más simple la implementación de filtros de región cuadrada o rectangular.

La operación de los filtros puede ser sintetizada de la siguiente manera:

El origen de la matriz de coeficientes de filtro es colocado en el píxel (x,y) de la imagen original I. Los coeficientes del filtro H(i,j) son multiplicados por los correspondientes píxeles de la imagen obteniéndose así 9 diferentes productos. Todos los productos son sumados y el resultado es colocado en la posición (x,y) de la imagen resultado I'. [Cuevas, 2010]

Las imágenes holográficas representan un verdadero desafío a la hora de mejorar la calidad final de la imagen. Múltiples problemas afectan a esta. En primer lugar nos encontramos con el speckle, que afecta la totalidad de la imagen tanto durante su construcción como su reconstrucción. Además, nos encontramos con el término de continua y la existencia de los armónicos espaciales, los cuales pueden superponerse generando una verdadera confusión. Finalmente, el perfil del haz de referencia que termina afectando la uniformidad en la intensidad de la imagen.

Los ensayos mostrados en el Capítulo III se realizaron mediante la aplicación de HI de manera que la imagen sobre la que se trabajaba correspondía a una imagen obtenida mediante la digitalización del holograma fotográfico. Para esto se tomaba una fotografía (película o digital) y se la procesaba en el ordenador. El primer paso consistía en la transformación de una imagen RGB en una de tonos de grises de máxima definición. Posteriormente se aplicaban toda una serie de filtros “empaquetados” mediante programas de tratamiento de imágenes tales como el Corel Photopaint®. Lógicamente que los filtros aplicados no tenían una definición precisa y simplemente se buscaba transformar la imagen de manera que se maximizara la definición de las franjas o bien del objeto.

En holografía digital se captura el holograma directamente sobre el CCD, lo que permite trabajar con una imagen de interferencia digitalizada. A partir de esto, es posible aplicar filtros en diferentes etapas del procesamiento. Por ejemplo, antes o después de realizar la transformada de Fourier.

Una segunda diferencia radica en que el filtrado se realiza durante el procesamiento de la imagen por lo cual siempre queda abierta una instancia superior que es la de repetir la metodología aplicada en holografía convencional a las imágenes finales de holografía digital, tema tratado en el último punto.

En este apartado se documentan los resultados de la aplicación de diferentes tipos de filtros existentes en Matlab®, siendo el objetivo final integrarlos dentro del algoritmo de reconstrucción de la imagen. Inicialmente se busca lograr una mejor definición de la imagen de amplitud.

3.1. Implementación de filtros lineales por correlación y convolución

Dadas las características de la holografía digital, resulta lógica la aplicación de filtros basados en convolución y correlación. Ambas operaciones matemáticas se encuentran muy bien documentadas en la bibliografía de referencia (Cuevas, 2010).

La operación de convolución discreta para dos matrices puede expresarse como:

$$I'(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} I(x - i, y - j) \cdot H(i, j) \quad \text{Ec. 4-5}$$

Donde I es la matriz original y H la de los coeficientes. La matriz H es una matriz que define una región de tamaño R que afectará los valores de la matriz original. Los valores de H variarán según una regla particular y fuera del alcance valdrán cero.

Los filtros de convolución y correlación se diferencian en que las respectivas matrices de los coeficientes se encuentran rotadas 180° tal como se muestran a continuación.

3	0	1
2	4	2
1	0	1

1	0	1
2	4	2
3	0	3

Figura 4- 12. Ejemplo de matrices de los coeficientes aplicables para una operación de convolución o correlación respectivamente.

Básicamente los filtros de convolución o correlación realizan una de estas dos operaciones sobre la matriz imagen (aplicable antes o después de la reconstrucción del holograma). La operación es realizada entre esta matriz y una matriz denominada de los coeficientes, la cual indica las dimensiones y el alcance de la operación. Cuando hablamos de las dimensiones hacemos referencia a la cantidad de píxeles que serán afectados, mientras que el alcance dependerá del valor de los coeficientes. Así podríamos definir una matriz lineal constituida por valores de igual peso, por ejemplo una matriz de unos o bien una matriz cuyos valores sean definidos por una función gaussiana o laplaciana.

Aplicación de los filtros de correlación a la matriz del holograma.

La aplicación de los filtros de correlación a la imagen capturada por la cámara se realiza luego de haber convertido la imagen original en una imagen en escala de grises.

Si se utiliza una matriz H de tipo lineal y se varía el alcance partiendo de un $R=1$ los resultados son mostrados en la figura 4-13.

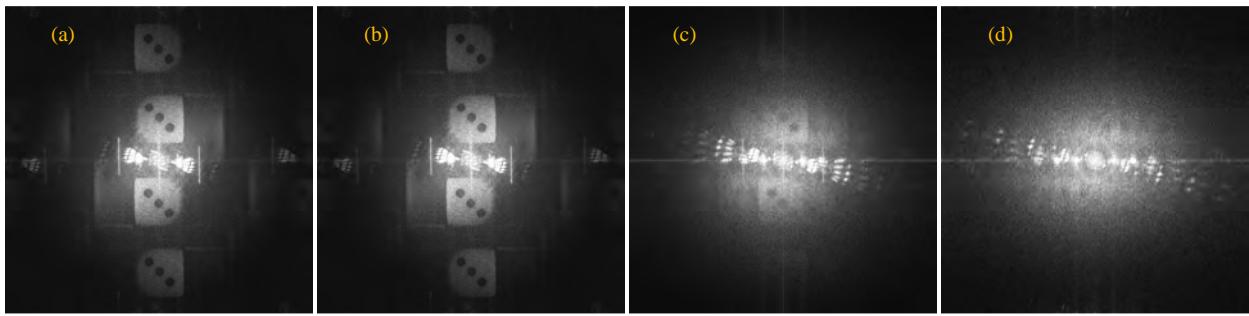


Figura 4- 13. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida con un filtro de correlación [1,1] de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro de correlación [2,2]. (d) Imagen reconstruida con un filtro de correlación [3,3].

En esta, es evidente que la aplicación de este tipo de filtro a la imagen original del holograma no genera una reconstrucción que muestre indicios de mejora. Por el contrario parte de la información original del holograma se pierde en el proceso de filtrado en la medida que la matriz de los coeficientes crece en dimensiones.

Una alternativa es la aplicación de una matriz de coeficientes predefinida tal como

$$H_{\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz a la cual se llegó a partir de la modificación de la matriz lineal de radio 3 buscando aislar el término de continua y las interferencias de los filtros de la cámara. Además, al algoritmo se le agregaron ciclos recursivos los cuales aplicaban un número n de veces el filtro a la imagen ya filtrada.

Los resultados pueden verse en la figura 4-14 en la cual se documentan los resultados.

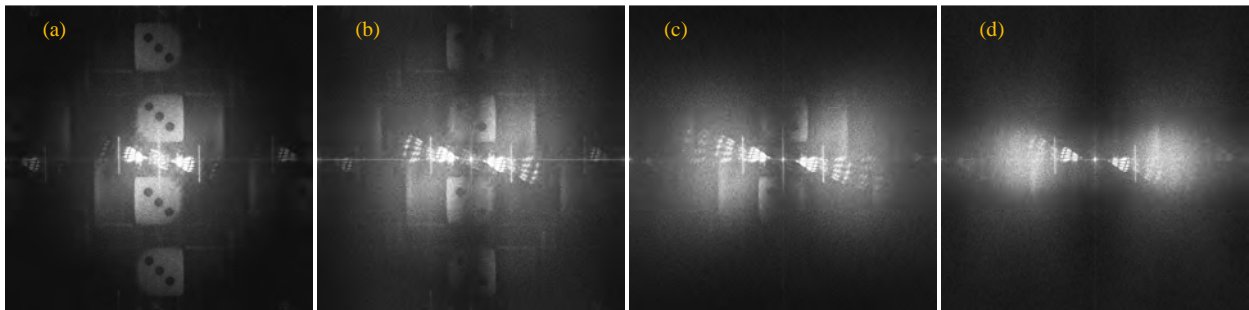


Figura 4- 14. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida con un filtro de correlación H_{α} de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro de correlación H_{α} con recurrencia de tercer orden (d) Imagen reconstruida con un filtro de correlación H_{α} con recurrencia de décimo orden.

En esta, vemos que si bien la imagen del holograma digital se ve degradada la imagen central se ve inalterada. La posibilidad de aislar la imagen de continua junto con el ruido de interferencia del filtro de la cámara, permitiría utilizar esta propiedad para una mejora mediante algoritmos de sustracción. [Cuevas, 2010]

Aplicación de los filtros de correlación a la matriz de la imagen reconstruida.

Las mismas operaciones pueden ser ahora aplicadas a la imagen reconstruida, en este caso ya no trabajamos sobre una imagen holográfica proveniente de una interferencia, lo hacemos sobre una imagen fotográfica digital de intensidades. La aplicación de este filtro posteriormente a la reconstrucción de la imagen, permite una leve mejoría en la definición de la imagen, cuando la matriz de los coeficientes crece. Si a esta se la extiende de manera de afectar los 100 píxeles

asociados [10,10], entonces se observa como la parte central de la imagen reconstruida se degrada totalmente.

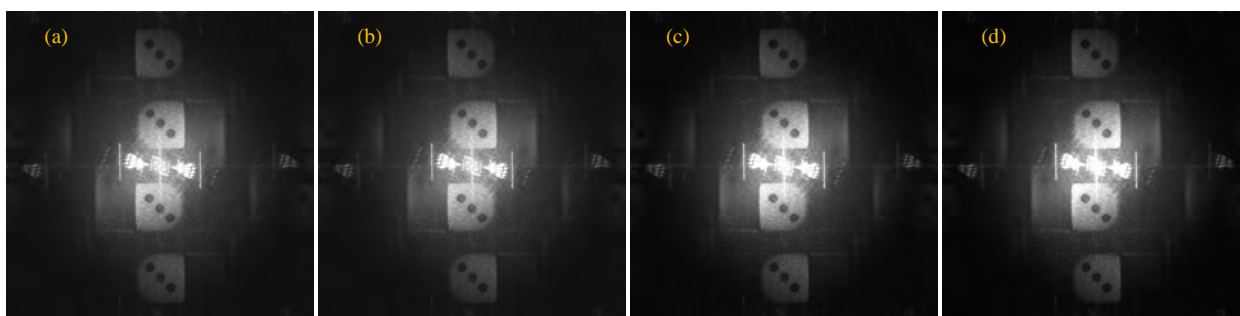


Figura 4- 15. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida filtrada con un filtro de correlación [1,1] de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro de correlación [2,2]. (d) Imagen reconstruida con un filtro de correlación [3,3].

La aplicación de la matriz de los coeficientes lineales, tal como la aplicada anteriormente, dará como resultado un filtrado en el cual en la medida que el número de iteraciones crece la imagen resulta degradada hasta la eliminación total de la misma.

De lo anteriormente documentado, queda en claro que los filtros de correlación son competentes cuando se aplican sobre la imagen final, una vez reconstruida. Sin embargo, la aplicación de un filtro de correlación de coeficientes definidos a la imagen holográfica, actúa eliminando la información de alta frecuencia espacial (holograma), permitiendo de esta manera aislar la información sobrepuesta al patrón de interferencia. Evidentemente esta propiedad podría ser utilizada para la eliminación de parte del ruido del holograma.

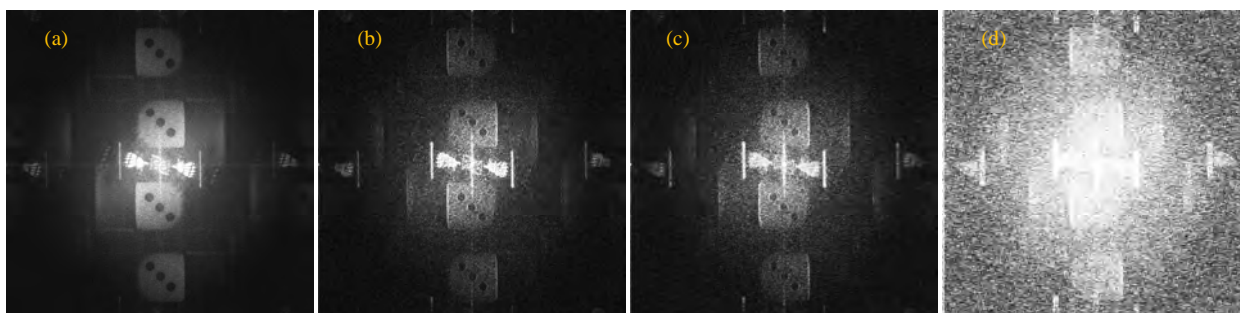


Figura 4- 16. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida con un filtro de correlación H_a de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro de correlación H_a con recurrencia de tercer orden. (d) Imagen reconstruida con un filtro de correlación H_a con recurrencia de décimo orden. En los tres casos aplicado a la imagen reconstruida.

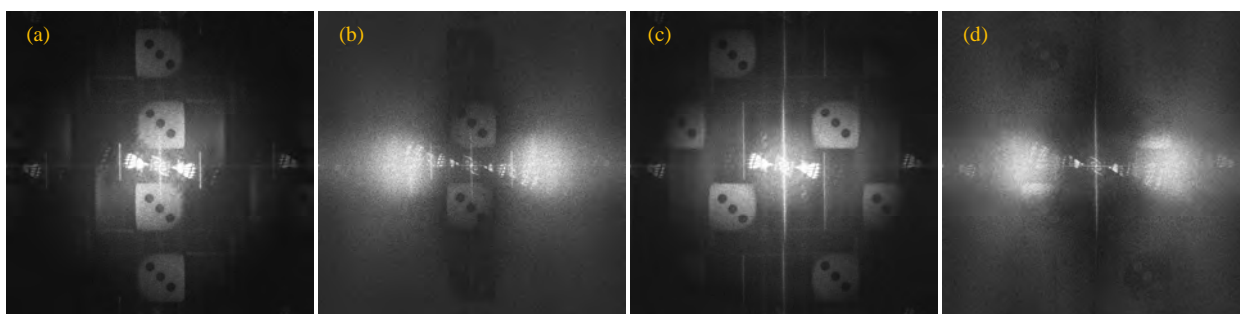


Figura 4- 17. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen resultante de la resta del proceso de filtrado y sustracción (baja frecuencia espacial). (c) Imagen reconstruida sin la aplicación de filtros pero con una geometría óptica diferente. (d) Imagen resultante de aplicar el mismo procedimiento que en la imagen (b).

Si se realiza la resta de las imágenes resultantes (con y sin filtrado), solo se obtendrían resultados en el caso en el cual la imagen holográfica se encuentre centrada en la matriz de reconstrucción, de

lo contrario el holograma será igualmente eliminado. Ejemplo de esto puede verse en la figura 4-17 en la cual se aplica un procedimiento de filtrado y sustracción en dos hologramas diferentes.

Aplicación de los filtros de convolución a la matriz del holograma.

Los filtros de convolución son una alternativa a los filtros de correlación. Estos se implementan de igual manera, con la única diferencia de indicar en la sentencia que la matriz de los coeficientes y la matriz de la imagen serán afectadas por éste operador.

Siguiendo igual metodología, se aplicaron filtros de convolución antes y después del procesamiento del holograma. Los resultados fueron en todos los casos similares sin existir una mejora evidente en la definición de la imagen holográfica en ninguno de los casos estudiados. Sin embargo la aplicación de esquemas ópticos específicos, filtros de convolución/correlación permitirían la eliminación de gemelos de orden superior.

3.2. Implementación de filtros gaussianos.

Un segundo grupo de filtros corresponde a los filtros predefinidos de dos dimensiones. Entre estos nos encontramos con la posibilidad de crear filtros de perfil gaussiano. Estos filtros se sustentan en una matriz de coeficientes cuadrada, cuya distribución de valores responde a una función de distribución gaussiana con una desviación estándar predefinida. Son filtros de tipo pasa bajos, lo cual permitiría en un principio reducir el nivel de speckle comprendido en el espectro de alta frecuencia. Además podría ser utilizado para reducir el número de imágenes armónicas reconstruidas.

Para probar estos principios, se realizaron una serie de ensayos donde se ubicaron las sentencias de los filtros recursivos tanto antes como después de la transformada de Fourier del holograma.

En estos filtros existen dos parámetros a definir: por un lado el tamaño de la matriz de los coeficientes y por el otro el número de veces que se recurre el filtro.

Si se aplica el filtro antes de la reconstrucción de la imagen, el tamaño de la matriz de los coeficientes no afecta el resultado de la reconstrucción a partir de un valor superior a 5. Por otra parte el número de veces que se aplique el bucle recursivo, definirá la frecuencia de corte de los armónicos mostrados en la reconstrucción. En la figura 4-18 se puede observar el resultado de aplicar un filtro pasa bajos. La imagen reconstruida, a partir de sucesivas recursividades, permite observar el término de continua junto con el armónico de primer orden.

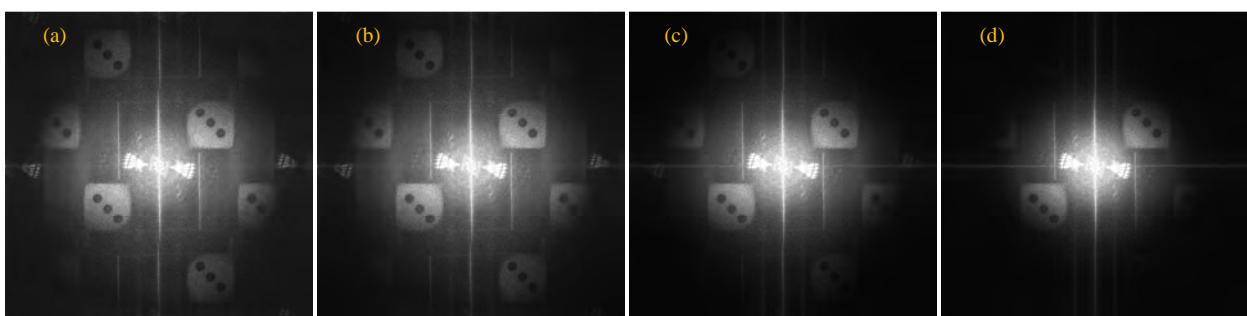


Figura 4- 18. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida filtrada con un filtro gaussiano [5,5] de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro gaussiano [5,5] con 4 recurrencias. (d) Imagen reconstruida con un filtro gaussiano [5,5] de 8 ciclos recursivos. Aplicación realizada sobre la matriz del holograma transformada a escala de grises.

La aplicación del mismo filtro luego de la reconstrucción genera una reducción del ruido de alta frecuencia, constituido por el patrón de speckle superpuesto a la imagen. Como consecuencia la imagen resulta suavizada pero al mismo tiempo la imagen no holográfica montada en el centro se ve magnificada.

Es evidente que la aplicación de éste tipo de filtro redundante en una notable mejora en la definición de la imagen de amplitud, pudiendo aplicarse contemporáneamente antes y después de la reconstrucción. La aplicación antes de la reconstrucción, nos permitirá reducir el número de armónicos visibles y la aplicación posterior reducir el nivel de ruido speckle.

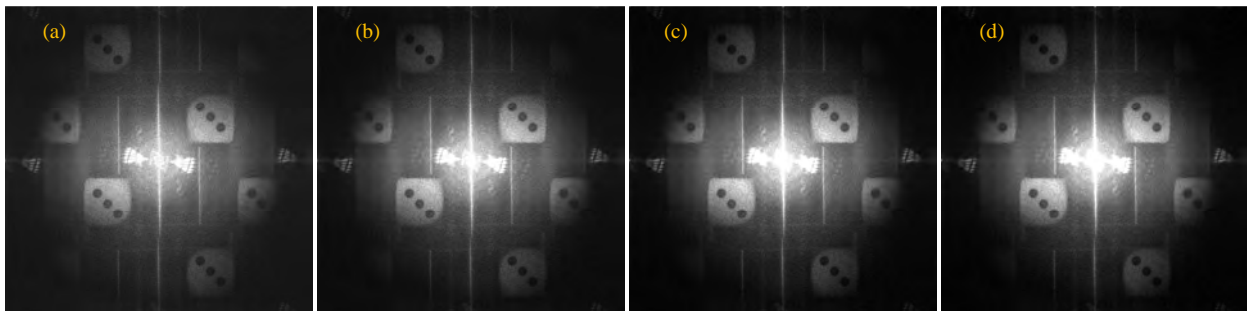


Figura 4- 19. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida filtrada con un filtro gaussiano [5,5] de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro gaussiano [5,5] con 4 recurrencias. (d) Imagen reconstruida con un filtro gaussiano [5,5] de 8 ciclos recursivos. En todos los casos corresponde a la aplicación del filtro luego de la reconstrucción.

3.3 Implementación de filtros de remoción de ruido.

Otra de las funciones que resulta de interés es la denominada función de reducción de ruido, esta se basa en el análisis de la media y la variancia del entorno de cada píxel. Evidentemente este se encuentra fuera del grupo de los filtros lineales y es especialmente indicado para la reducción del denominado ruido blanco. En nuestro caso el ruido blanco queda definido fundamentalmente por el patrón de speckle superpuesto sobre la imagen.

Este es un tipo de filtro pasa bajos aplicable a imágenes en escala de grises, que contempla una distribución de ruido de tipo gaussiano, con una matriz de coeficientes de tamaño seleccionable. Este tipo de filtros realiza un suavizado leve cuando la variancia obtenida del análisis estadístico de los valores que rodean a cada píxel resulta pequeña y se incrementa con el incremento de este valor.

La aplicación de este tipo de filtro fue probada, al igual que en los casos anteriores, antes y después de la FFT encontrándose resultados óptimos solamente luego de realizada la transformada de Fourier.

De las figuras 4-20 y 4-21 es evidente que el nivel de speckle se ve notablemente reducido, sin embargo esta operación genera una suerte de desenfoque de la imagen resultante en la medida que el número de ciclos recursivos aumenta.

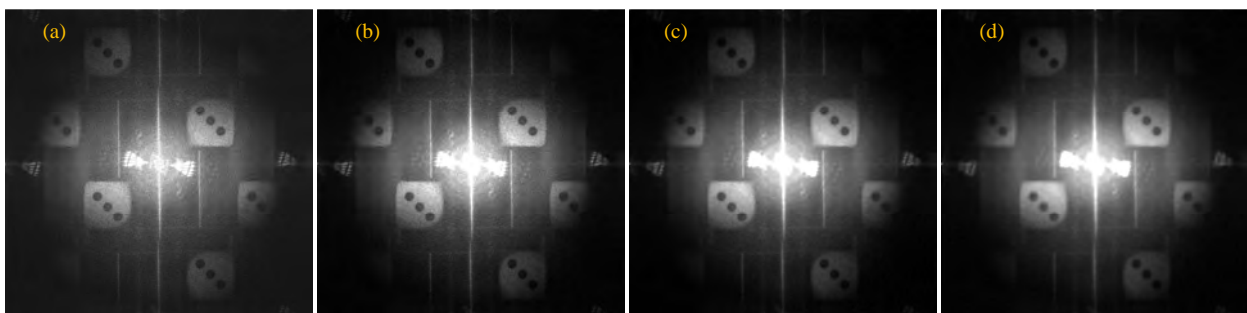


Figura 4- 20 (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida filtrada con un filtro de reducción de ruido [5,5] de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro de reducción de ruido [5,5] con 5 recurrencias. (d) Imagen reconstruida con un filtro reducción de ruido [5,5] de 10 ciclos recursivos. En todos los casos corresponde a la aplicación del filtro luego de la reconstrucción.

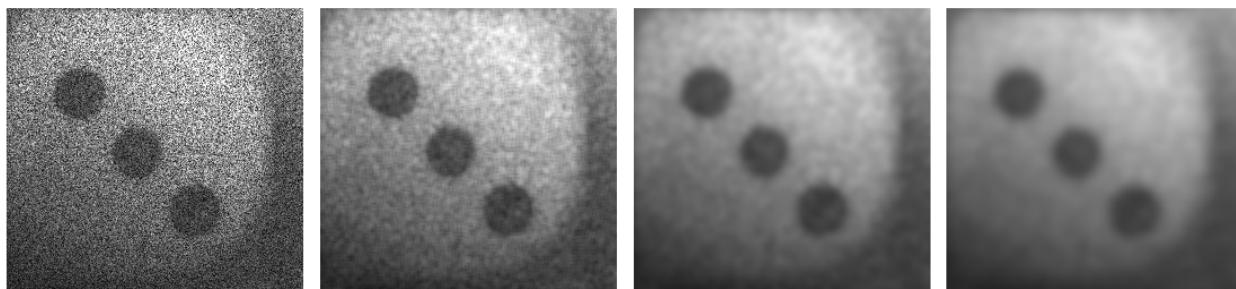


Figura 4- 21. Ampliación de la imagen reconstruida correspondiente a la imagen real de la primera armónica. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida filtrada con un filtro de reducción de ruido [5,5] de simple recurrencia. (c) Imagen reconstruida con un filtro de reducción de ruido [5,5] con 5 recurrencias. (d) Imagen reconstruida con un filtro reducción de ruido [5,5] de 10 ciclos recursivos. En todos los casos corresponde a la aplicación del filtro luego de la reconstrucción.

3.4. Mejora de la imagen de amplitud posterior a la reconstrucción.

Si lo que se desea finalmente es obtener una imagen de amplitud de gran calidad, con el solo fin de documentar el resultado obtenido, es posible aplicar métodos similares a los utilizados en holografía fotográfica. En esta, los hologramas eran digitalizados mediante una cámara de CCD. Las imágenes así obtenidas, normalmente en RGB, eran llevadas a un programa de procesamiento de imágenes tal como el Corel Photopaint[®]. En este programa se las convertía a escala de grises y posteriormente se las procesaba aplicando la familia de filtros disponibles hasta obtener el resultado deseado (por ejemplo magnificación en la definición de franjas de interferencia).

Lo mismo puede ser realizado sobre las imágenes finalmente grabadas luego de la reconstrucción.

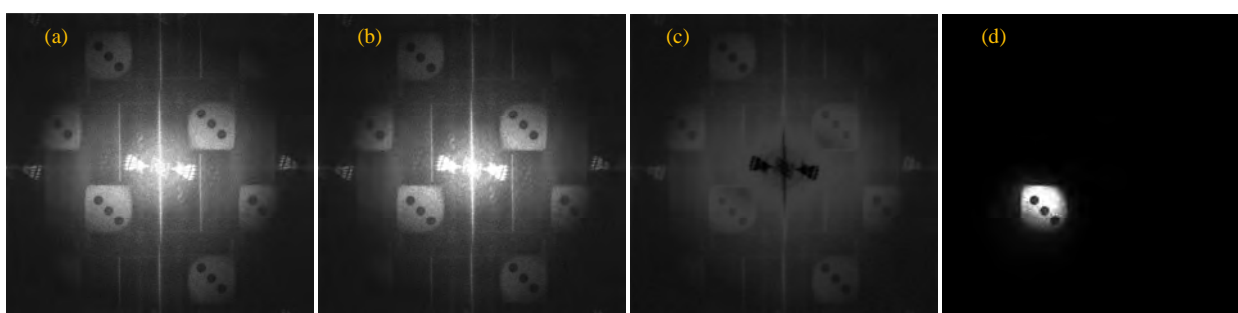


Figura 4- 22. (a) Imagen reconstruida sin aplicación de filtro. (b) Imagen reconstruida suavizada y con eliminación de ruido. (c) Imagen reconstruida posteriormente invertida. (d) Imagen reconstruida con aislamiento de zona de interés.

En la figura 4-22, se muestran diferentes casos de cambios en la imagen resultante usando un software de modificación de imágenes. Este presenta las mismas funciones que pueden ser implementadas mediante programación en Matlab[®], aplicada mediante cuadros de dialogo interactivos pero de códigos cerrados. Puede intuirse que los algoritmos de filtrado poseen igual base matemática pero para el usuario solo son opciones de un menú.

Capítulo V: Resultados obtenidos con interferometría holográfica digital.

En el Capítulo III se documentaron diferentes tipos de ensayos mediante HI, diferenciándolos mediante el método de inducción de la deformación. Oportunamente se los dividió en métodos de inducción dinámicos y métodos de inducción estáticos.

En holografía interferométrica digital (HID), la obtención de la imagen se encuentran definida por una serie de condiciones tales como las dimensiones de la pieza, el estrecho ángulo de observación, la formación de gemelos entre otras. Esto lleva a la necesidad de definir los límites del esquema óptico utilizado y la posibilidad cierta de aplicación.

En este capítulo se comienza indicando los resultados preliminares de ensayos realizados por HID, en los cuales se busca encontrar los límites de la implementación práctica. Así, se comenzará con la documentación de los métodos de inducción de las deformaciones estáticas para luego dar lugar a los métodos dinámicos. Siguiendo los aspectos generales de la interpretación del holograma interferométrico, planteados en el Capítulo II, profundizaremos respecto de la forma de realizar análisis cualitativos y cuantitativos en la HID.

Finalmente se muestran diferentes aplicaciones de la HID en ensayos no destructivos, divididos en análisis cualitativos y cuantitativos. Algunos de estos, son extensión de los ensayos de HI. Otros son aplicaciones nuevas que muestran la facilidad de implementación de la HID respecto de la HI. Parte de las aplicaciones aquí documentadas han sido presentadas en congresos internacionales o se encuentran en etapa de evaluación para su publicación.

1. Métodos de inducción de la deformación.

1.1. Métodos estáticos.

Como métodos de inducción de deformaciones estáticas se seleccionaron:

- Variación térmica del objeto.
- Deformaciones inducidas mediante compresiones.
- Deformaciones inducidas mediante tensiones.
- Desplazamientos.

En cada uno de los ensayos se analizaron las posibilidades de inducir en forma acotada la deformación. Con más detalle: definiendo la magnitud de la excitación y el sentido de la deformación. Para esto en el caso de las deformaciones por variación térmica, en lugar de utilizar la dilatación de un cuerpo, se trabajó sobre la deformación esperada en un material bimetálico.

En cada uno de los casos estudiados se tuvo especial cuidado en la definición de los tiempos y métodos de calibración del esquema óptico, buscando de esta manera establecer parámetros que permitieran realizar un análisis comparativo de la aplicación de la HI y la HID.

Resultado obtenido cuando es inducida una deformación por variación térmica.

Como se mostró en los ensayos del Capítulo III, la variación térmica del objeto suele ser el método más simple de implementar para generar deformaciones sobre la pieza bajo estudio. Sin embargo, se debe tener especial cuidado a la hora de lograr una distribución uniforme de la temperatura en el objeto. Uno de los aspectos fundamentales es el de evitar que en los puntos de apoyo del objeto

exista un gradiente elevado de temperatura. Para evitar esto, se deben usar materiales de bajo coeficiente de conductividad térmica para este fin.

Un caso particular de deformación térmica es el introducido mediante la utilización de dispositivos bimetalicos. Si una corriente eléctrica se hace circular por estos, debido al aumento de temperatura, se registrará una deformación de tipo flexión. Este mecanismo puede ser usado para estudiar el comportamiento de estos materiales así como también como método de inducción de desplazamientos o deformaciones mecánicas indirectas.

En este caso, una barra de material bimetalico obtenida de una llave interruptora de accionamiento térmico, fue sometida a la circulación de una corriente eléctrica de bajo valor nominal.

El ensayo se realizó mediante sucesivas tomas, en las cuales se incrementaba gradualmente el nivel de corriente hasta la visualización de franjas en los HID.

Una vez obtenidos los patrones deseados se procedió con la obtención de los diagramas de fase demodulada.

En la figura 5-1 se muestra el holograma de amplitud, imagen real, la imagen de fase también real y de primer orden, la imagen filtrada mediante un filtro seno coseno y finalmente el diagrama de fase desenrollada. De este último se puede observar que la deformación total registrada corresponde a una diferencia de fase de 50 radianes. El valor de la deformación total puede ser calculado con auxilio de la ecuación 2-45, siendo indispensable conocer los ángulos de iluminación y observación, no medidos en esta oportunidad dado que solo se buscaba lograr la formación de franjas.

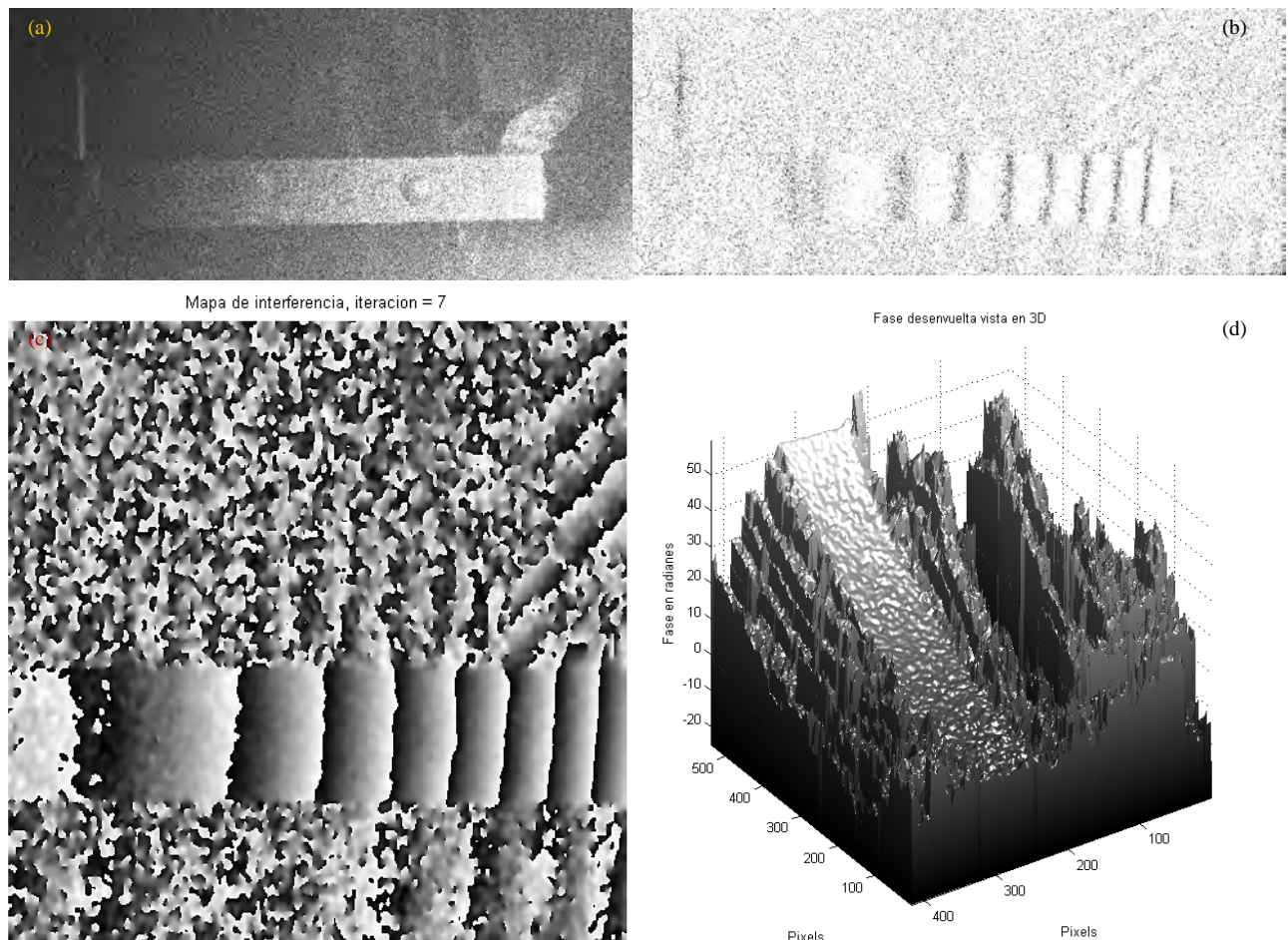


Figura 5-1. (a) Imagen de amplitud de una barra bimetalica. (b) Imagen de fase luego de introducir deformación mediante temperatura con una corriente de 130 mA. (c) Imagen del HID de fase luego de la aplicación de un filtro seno -coseno con 7 iteraciones. (d) Diagrama de fase demodulada de la misma pieza mediante el método Brunch-Cut.

Un aspecto particular es la coincidencia entre el patrón obtenido durante la flexión del material bimetalico por temperatura y el patrón simulado de la figura 2-52. En ambos casos la zona de menor

deformación se registra como una franja clara seguida de una ancha franja oscura. En la medida que la flexión aumenta las franjas se tienden a juntarse.

Resultado obtenido cuando son inducidas compresiones.

Las compresiones mecánicas resultan muy fáciles de ser implementadas, estas pueden ser introducidas variando el peso en un punto de apoyo. Sin embargo, debe prestarse particular atención en el modo en el cual se realiza esta operación. Dado que en un HID se están registrando deformaciones de algunas micras, el sistema de inducción junto con el punto de apoyo deben ser sumamente estables, de lo contrario el sistema introducirá movimientos que no son derivados de la compresión.

De la inducción de una compresión se esperan deformaciones, que en el caso particular de un material elástico, obedezcan a una deformación pura en el sentido inducido.

Una de las posibilidades para la reducción de los efectos derivados de inestabilidades en el sistema es usar deformaciones puras en y , entendiéndose que en el plano del objeto este eje representa la vertical. Así, tal como queda expresado en la ecuación 2-53, las magnitudes de las deformaciones registradas por el patrón de interferencia se ubicarán sobre la centena de micras, mientras que en las otras dos dimensiones siempre estarán por debajo de los $10\text{ }\mu\text{m}$. De estas forma las franjas correspondientes a (x,z) se visualizarán sumamente juntas o bien no se las podrá visualizar.

En la figura 5-2 se muestra un ensayo realizado sobre una pieza de goma correspondiente al soporte de aislación mecánica de la suspensión de automóvil.

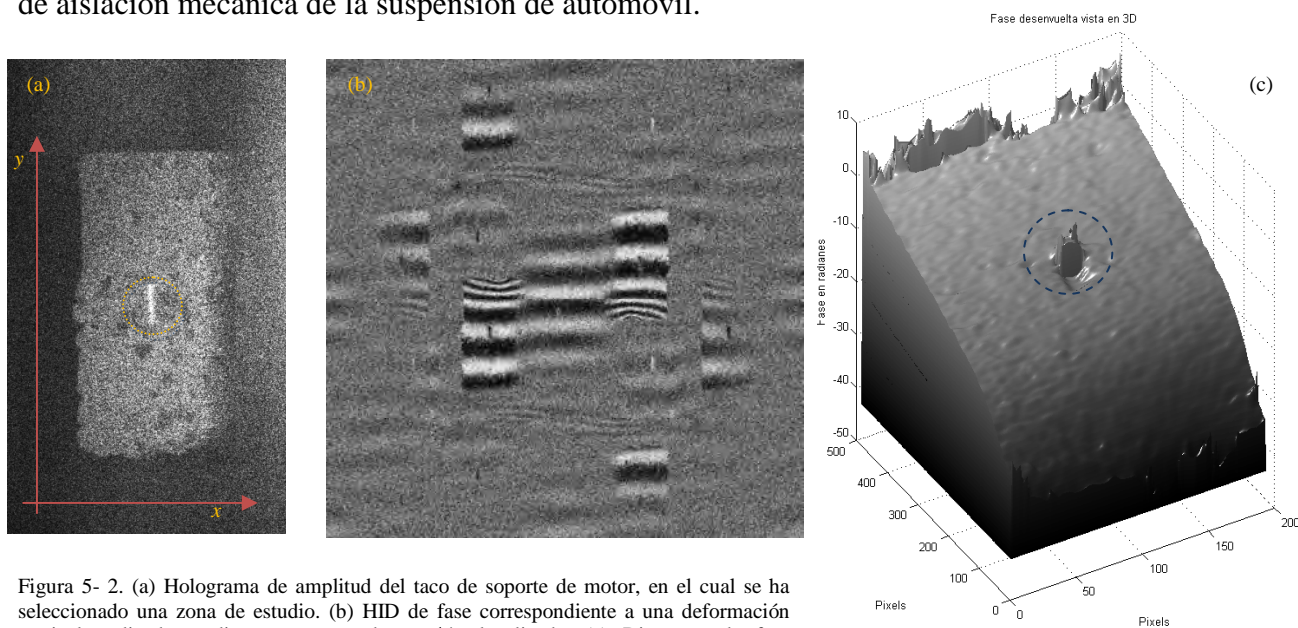


Figura 5- 2. (a) Holograma de amplitud del taco de soporte de motor, en el cual se ha seleccionado una zona de estudio. (b) HID de fase correspondiente a una deformación vertical, aplicada mediante aumento de presión localizada. (c) Diagrama de fase demodulada. Nótese el efecto que causa el reflejo indeseado en la zona central del objeto.

En este caso la deformación en radianes obtenida del diagrama de fase demodulada fue de 45 rad , correspondiente a una deformación mecánica total de $753,1\text{ }\mu\text{m}$. En este caso no se procedió con el recorte de la imagen, de acuerdo con lo establecido en el Capítulo IV. Aquí, puede observarse claramente el patrón de interferencia sobre la imagen real (izquierda) y la virtual (derecha) mostrándose modulación sobre el termino de continua e imágenes degradadas del segundo y tercer armónico.

La ubicación del objeto siguiendo las transformadas indicadas en el Capítulo IV, lleva a la posibilidad de aislar, si así se desea, la imagen real sin inconvenientes.

Circunscripto se muestra un reflejo que se superpone sobre la imagen, pero que no proviene del objeto posiblemente de alguno de los soportes del esquema. Este, afecta no solo la imagen de amplitud si no también la imagen de fase, generando una pérdida de continuidad en el diagrama de fase demodulada.

Resultado obtenido cuando son inducidas tracciones.

Igualmente aplicable es la inducción de una deformación por tracción. En esta es necesario definir tanto el sentido de la deformación como la magnitud. Ambas variables son dependientes de la pieza bajo estudio y su elasticidad. En la figura 5-3 es mostrado un esquema en el cual una banda de látex fue sometida a tracción mediante un mecanismo de desplazamiento micrométrico. Se seleccionó este objeto a partir de la capacidad de deformación y en particular por el hecho que la deformación total inducida por el actuador micrométrico se distribuiría a lo largo de toda la banda. Así, si se estudia un pequeño trozo de esta, entonces independientemente del mínimo desplazamiento del tornillo micrométrico, el estiramiento de la banda sería mucho menor. De esta manera se aseguraría que la deformación inducida se encontrara dentro del rango de medición de la HID.

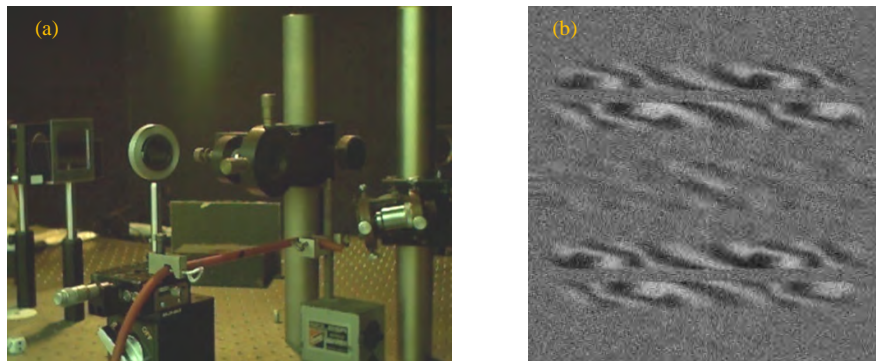


Figura 5- 3. (a) Esquema óptico utilizado y sistema de tracción implementado mediante una base de traslación micrométrica (b) Holograma de fase correspondiente a un desplazamiento de 5 μm .

Luego de sucesivas rotaciones del eje del tornillo micrométrico del actuador unidireccional y sus correspondientes capturas se reconstruye la imagen de fase de la figura 5-3(b). Fácilmente es identificable el patrón resultante que indica un comportamiento muy poco homogéneo a la tracción. Las franjas muestran un cierto ángulo de inclinación asociado a curvaturas aleatorias, propias de un material sometido a un cambio volumétrico de sus dimensiones. En este caso, no solo existió una deformación pura en x , además se hace evidente el afinamiento de la banda a partir de la reducción de su radio (plano y,z).

Resultado obtenido cuando son inducidos desplazamientos.

De acuerdo con lo expuesto en las simulaciones de franjas del Capítulo II, es posible detectar la traslación de un cuerpo cuando el desplazamiento se produce en el sentido perpendicular al plano del objeto.

Una posibilidad es la mostrada en la figura 5-4 donde un dado, posicionado sobre una plataforma móvil, es desplazado mediante el movimiento de un tornillo micrométrico.

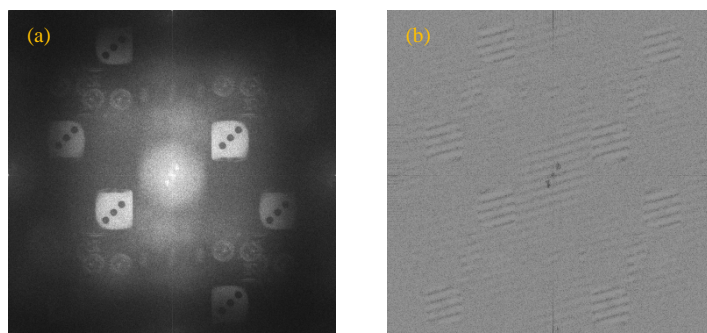


Figura 5- 4. (a) Imagen de amplitud de un dado, en la cual se ven las imágenes virtuales y reales de hasta tercer. (b) Holograma de fase que muestra un desplazamiento de 5 μm , obtenido mediante un algoritmo sin filtrado de la imagen de fase.

En el holograma de fase pueden verse sobre cada uno de los armónicos y del término de continua la formación de franjas que indican un desplazamiento en sentido perpendicular al plano del objeto cuando los ángulos de observación e iluminación no se encuentran en la condición de deformación pura en z (Ángulos de igual magnitud).

1.2.Inducción de las deformaciones por métodos dinámicos.

Inducción de deformaciones por medio de ondas de sonido.

En el Capítulo III, se mostraron aplicaciones de la HI en la cual la deformación era inducida mediante ondas de sonido. Anteriormente presentamos el caso particular de la excitación de una pintura mediante el uso de un buzzer de frecuencia constante. También se demostró el comportamiento de una membrana vibrante.

En holografía digital, podría ser aplicado sin inconvenientes la misma forma de inducción con el mismo tipo de actuador. Ejemplo de esto puede verse en la figura 5-5 en la cual se muestra la barra de material bimetalico usada en los ensayos por inducción térmica, sometida a vibraciones mediante el uso del mismo buzzer.

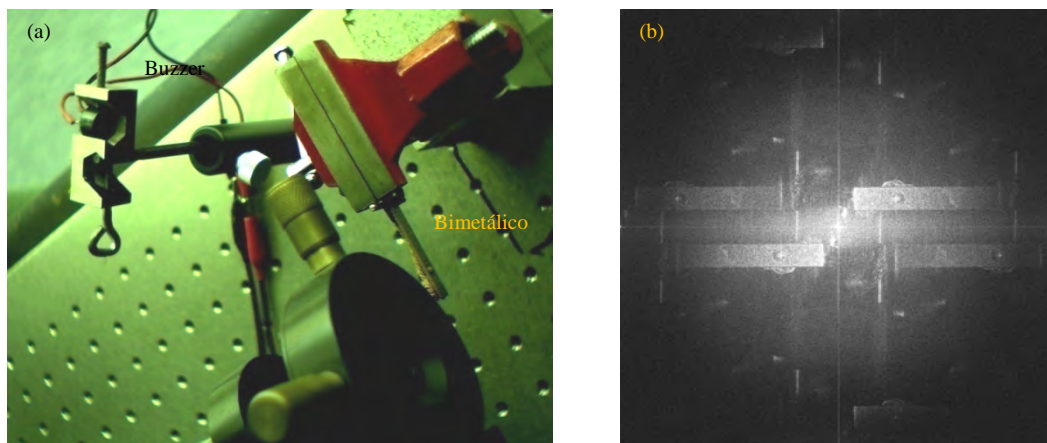


Figura 5- 5. (a) Fotografía, vista superior, del montaje para lograr la oscilación del material bimetalico, mediante ondas de sonido. (b) Holograma de amplitud de la pieza bajo estudio.

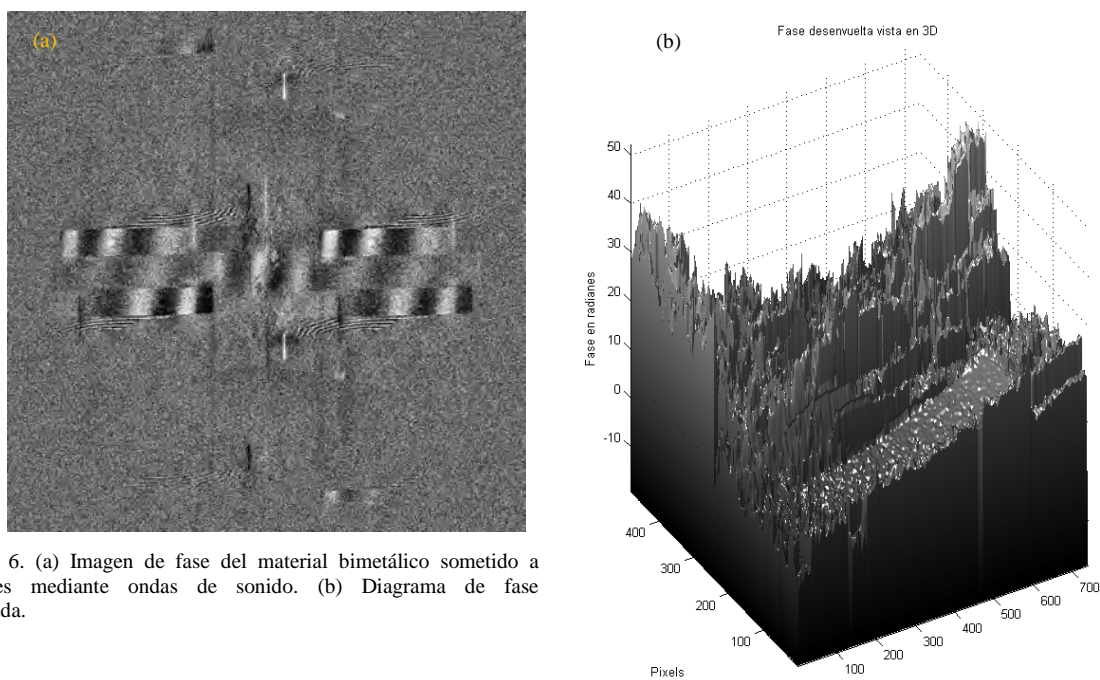


Figura 5- 6. (a) Imagen de fase del material bimetalico sometido a vibraciones mediante ondas de sonido. (b) Diagrama de fase desenrollada.

Para esto se montó el buzzer a 10 cm de la barra de material bimetálico, sostenido por un soporte fijado a la mesa. El bimetálico fue sostenido mediante una morsa de masa considerada infinita respecto de la de la barra, con el fin de evitar vibraciones del soporte. Nuevamente la corriente del buzzer fue variada en pasos de 1 mA desde los 3 mA hasta los 12 mA, obteniéndose HID para cada una de las corrientes.

En la figura 5-6, se observa el holograma de fase corregido y el correspondiente diagrama de demodulación de fase. Nótese que la repuesta obtenida a la oscilación es similar a la registrada mediante calentamiento del bimetálico. Resulta interesante la deformación sufrida por el cable de conexión al bimetálico. Este, presenta magnitudes de deformación mucho mayores al encontrarse suspendido libremente.

El diagrama de fase demodulada se muestra como un diagrama de deformación cuando en realidad muestra los extremos de una oscilación. Nuevamente el diagrama de fase demodulada resulta en una herramienta útil para la cuantificación, pero sacrifica información relevante.

Inducción de deformaciones por medio de oscilaciones libres.

Las piezas elásticas presentan la particularidad de poder ser analizadas mediante métodos estáticos o dinámicos. Precedentemente vimos cómo era posible inducir mediante tracción una deformación sobre una banda circular de látex. Ahora, mediante vibraciones se plantea el estudio del comportamiento del mismo objeto.

Utilizando el mismo arreglo de la figura 5-3 se estiró hacia abajo la banda para luego liberarla, de manera que oscilara libremente. En este caso se usó la cámara de CCD en su configuración de filmación a 5 cuadros por segundo. En sucesivas experiencias se adquirieron filmaciones que posteriormente fueron procesadas en fotogramas. Así el primer cuadro se toma como referencia y respecto de este se realizaron sucesivos HID. Tres de los casos más interesantes son mostrados en la figura 5-7.

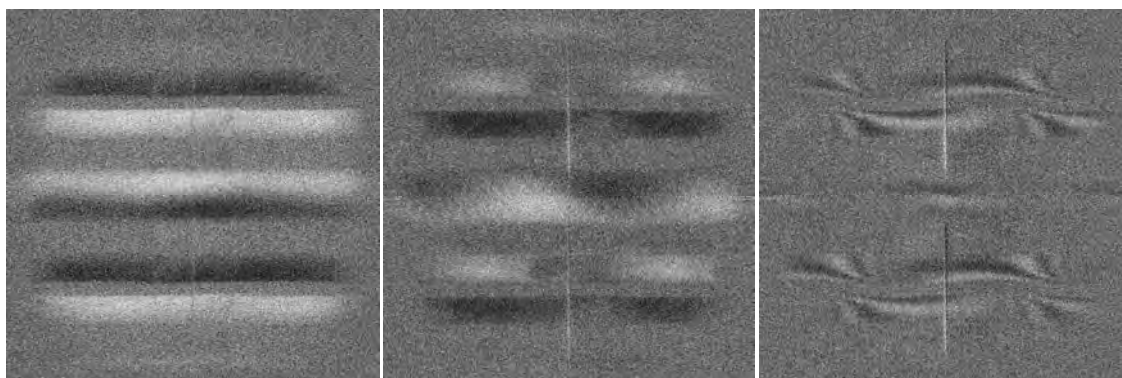


Figura 5-7. Secuencia de tres hologramas de fase correspondientes a tres diferentes amplitudes de oscilación de una banda de látex.

Nuevamente es posible observar la formación de franjas que representan patrones de deformación esperados. Evidentemente este ensayo es solo a título cualitativo y como mecanismo de ensayo del método de inducción de la deformación.

2. Análisis de los HID.

En el Capítulo II se presentó un pormenorizado estudio del significado cualitativo de los patrones de interferencia derivados de la holografía interferométrica. Con simulaciones se presentaron los diferentes ordenamientos de las franjas dependiendo del sentido de la deformación inducida.

Menor información pudo ser detallada, en aquel capítulo, respecto del análisis cuantitativo.

Los HID se presentan como una herramienta útil en análisis tanto cualitativos como cuantitativos [Schnars, 2005] por lo cual en este apartado se busca encontrar los límites de la información que puede obtenerse mediante esta forma de holografía.

2.1. Análisis cualitativo del holograma digital.

Dado que ya hemos profundizado el análisis cualitativo en el Capítulo II y sus aplicaciones en el Capítulo III, aquí se buscarán los límites de aplicación de la HID.

Al igual que en la HI, la información cualitativa aportada por la HID se aplica a la detección de:

- Grietas, fracturas o desprendimientos en el material bajo estudio.
- Puntos con tensiones residuales.

Al comenzar el análisis cualitativo, se deberá tener presente que el ángulo de observación es limitado al igual que el campo de observación, por lo que solo se obtendrá una distribución particular de franjas a diferencia de la HI. Para poder comprender con más detalle la información contenida en estas, deben conocerse aspectos particulares del montaje tales como: el ángulo de iluminación y de observación respecto del plano del objeto (Capítulo II). Así, es posible definir si las franjas representan una deformación en una o dos dimensiones, punto de partida para el análisis.

Detección de grietas, fracturas o desprendimientos.

La detección de alguna de estas anomalías es una de las aplicaciones más difundidas de la holografía, en particular en estudios del estado de conservación de obras de valor patrimonial. En todos los casos se busca encontrar cortes o discontinuidades en la dirección de las franjas que indiquen su existencia. En la figura 5-8 (a) se muestra mediante el uso de una lupa estereoscópica con un aumento de 30 veces el corte transversal de una zona de soldadura de dos barras de hierro. En esta puede verse claramente la existencia de un globo de aire encerrado en la zona de aporte de material, lo cual podría considerarse como un defecto del proceso de soldadura. En general, estos globos de aire se extienden dentro del material aportado, por lo que pocas veces son visibles. El uso de la HID con excitación térmica puede ser una herramienta que permita la detección de estos defectos desde el exterior.

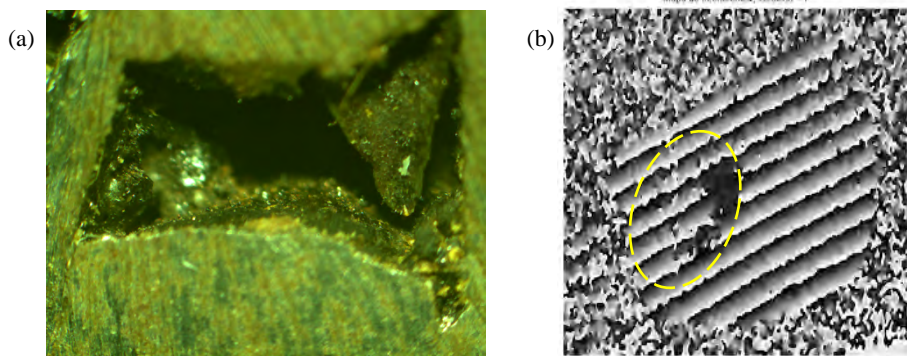


Figura 5- 8. (a) Magnificación X30 de un defecto de soldadura en la zona de aporte de material. (b) HID de la superficie en el cual puede verse la zona afectada por el defecto...

En la figura 5-8 (b), se ve el HID obtenido para una variación de 3 °C, donde se muestran una sucesión de franjas inclinadas, compatibles con una deformación volumétrica. En la zona circunscripta se puede observar en la parte superior una zona negra que representa la abertura de la burbuja mostrada en la figura 5-8 (a). Claramente se puede observar como desde esta zona se extiende hacia abajo una suerte de perturbación en el ordenamiento de las franjas. Esta anomalía puede asociarse con el desarrollo interior de la burbuja.

Un segundo ensayo fue realizado sobre la banda de látex de la figura 5-3. En este caso un profundo corte en sentido vertical y en forma perpendicular a la banda se hizo con el uso de una herramienta de gran filo.

En este ensayo, la inducción de la deformación fue dinámica, al igual que se hiciera en la experiencia documentada en la figura 5-7. Aplicando la misma metodología de captura y excitación se obtuvieron los HID mostrados en la figura 5-9 (b) y (c). En la figura (a) se muestra el holograma de calibración donde se aprecia claramente el corte realizado en la banda.

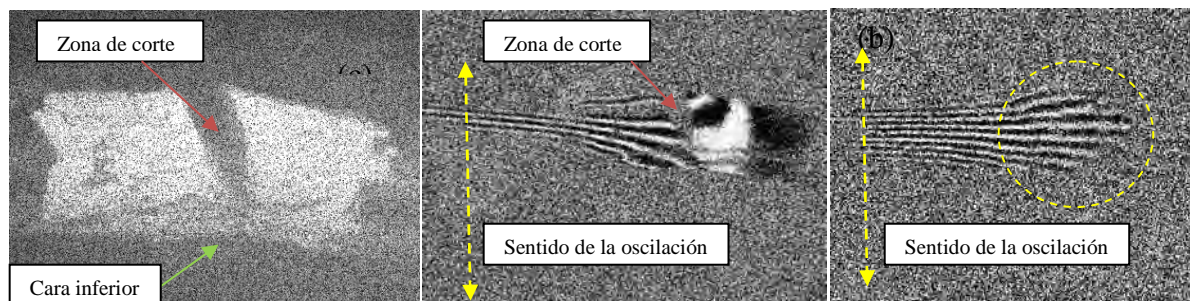


Figura 5-9. (a) Holograma de amplitud en el cual se observa el corte realizado sobre una banda de goma. (b) HID correspondiente a oscilación libre en el sentido vertical, correspondiente a la zona de corte. (c) HID de la cara opuesta a la zona de corte.

Las franjas resultantes de esta experiencia permiten detectar la existencia del corte. En la figura 5-9 (b) claramente se ve la discontinuidad en el material pero además se observa un cambio notable en el sentido y grosor de las franjas. En el lado derecho se manifiesta una excursión vertical con franjas horizontales muy juntas entre sí, mientras que del lado izquierdo del corte, un ordenamiento de franjas más cercano a un desplazamiento puro en z .

En la figura 5-9 (c), la banda de látex fue rotada de tal manera que el holograma obtenido corresponde a la parte inferior de la zona del corte, es decir donde este no es visible.

Si observamos el HID, en la zona circunscripta se observa la parte posterior a la zona donde fuera realizado el corte. Claramente se puede ver el cambio en la separación de las franjas que estaría indicando la presencia de un defecto.

Detección de tensiones residuales.

Finalmente, las tensiones residuales pueden ser observadas fundamentalmente mediante el uso de variación térmica del objeto, tal como se realizó en las partes E de núcleos de balastos para iluminación en el Capítulo III. En la figura 5-10 se muestra la imagen reconstruida mediante HID, del ángulo superior de una parte de una de las E ensayadas previamente.

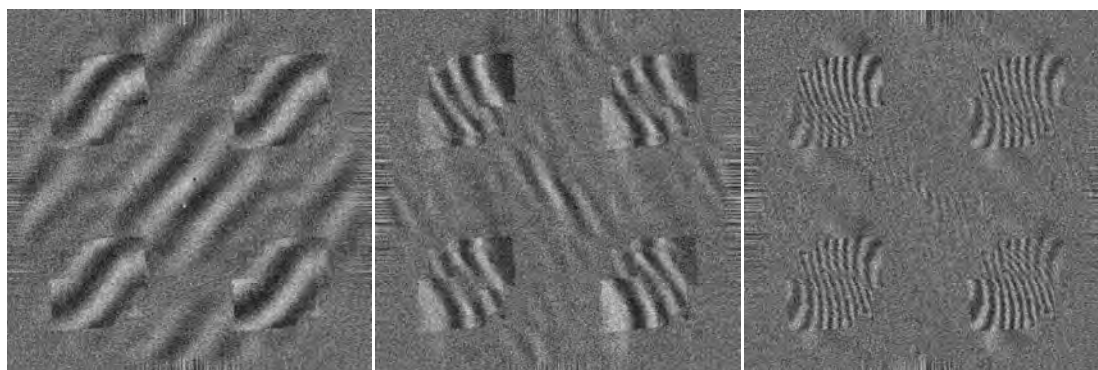


Figura 5-10. Secuencia de tres HID correspondiente con la parte superior izquierda de una E de transformador para intervalos de temperatura creciente.

En esta el resultado se repite al igual que el mostrado en la figura 3-18 (a), en la cual la pieza mostraba una uniformidad de distribución de franjas con una tendencia a una deformación

localizada en dirección z en la parte superior derecha. En la tercera imagen, puede observarse una distribución extraña en las franjas de interferencia. Esto se debe a la coincidencia en la formación de las imágenes gemelas de segundo orden las que se intermodulan con las de primer orden. Se debe prestar especial atención a la presencia de este fenómeno que puede en el mejor de los casos llevar a interpretaciones erróneas del comportamiento del objeto.

2.2. Análisis cuantitativo del holograma digital.

La HID tiene como principal ventaja la de obtener la reconstrucción de la imagen mediante la utilización de un algoritmo, del cual es posible establecer en forma directa la magnitud de la deformación. Mediante la demodulación de la imagen de fase es posible obtener la diferencia de fase total. Este valor, combinado con la determinación de los ángulos de observación e iluminación, permite la obtención de la magnitud del vector deformación. Para esto, es necesaria la medición de la longitud de las trayectorias y los ángulos, de manera de aplicarlos en forma directa a la ecuación 2-52.

Evidentemente que cuando la deformación es de tipo tridimensional no es posible obtener en forma directa la magnitud del vector d . Para esto existen múltiples técnicas que combinan más de un HID. [Schnars, 2005]

Por otra parte, de esta misma ecuación, podemos ver que la magnitud de la deformación en y debe ser varias veces mayor que las de (z, x) para poder ser registrada en el mismo patrón de franjas. A causa de esto, el análisis se realiza en el plano (z, x) . Bajo esta perspectiva sabemos que es posible definir la condición de deformación pura en z , en la cual independientemente del tipo de deformación sufrida por el objeto solo se visualizará la deformación en z . De la ecuación 2-52 vemos que esta condición se cumple cuando los ángulos de observación y el de iluminación son iguales tal como lo indica la ecuación 2-40.

Una segunda posibilidad de análisis cuantitativo directo puede ser obtenida cuando se conoce específicamente el sentido de la deformación.

Deformaciones unidimensionales.

Si existe la posibilidad de introducir una deformación unidimensional, esta podrá ser cuantificada fácilmente. Con el fin de obtener un valor exacto de la deformación, deberán ser medidas con precisión las distancias correspondientes a las trayectorias de iluminación y observación, con sus respectivos ángulos.

La forma más simple de generar deformaciones lineales es mediante la aplicación de presión sobre un objeto flexible, en el caso aquí presentado un fleje metálico de 10 cm de longitud y 3 cm de altura. La utilización de un tornillo micrométrico puede dar origen a una deformación del orden de los 10 μm con un mínimo error de paralaje. Una deformación menor puede ser producida en el sistema, pero solo podrá determinarse su magnitud mediante HID. Si el tornillo genera un desplazamiento en la dirección de deformación pura en z , entonces la magnitud del vector deformación puede ser rápidamente cuantificado.

De la ecuación 2-45, vemos que realizando la medición de los ángulos de incidencia y de observación, el cálculo de la magnitud de este vector se obtiene en forma directa.

Donde n es el número de franjas claras y oscuras que se definen en el holograma de fase. Una segunda alternativa es obtener el valor mediante la diferencia de fase total a partir de la rutina de demodulación de la fase.

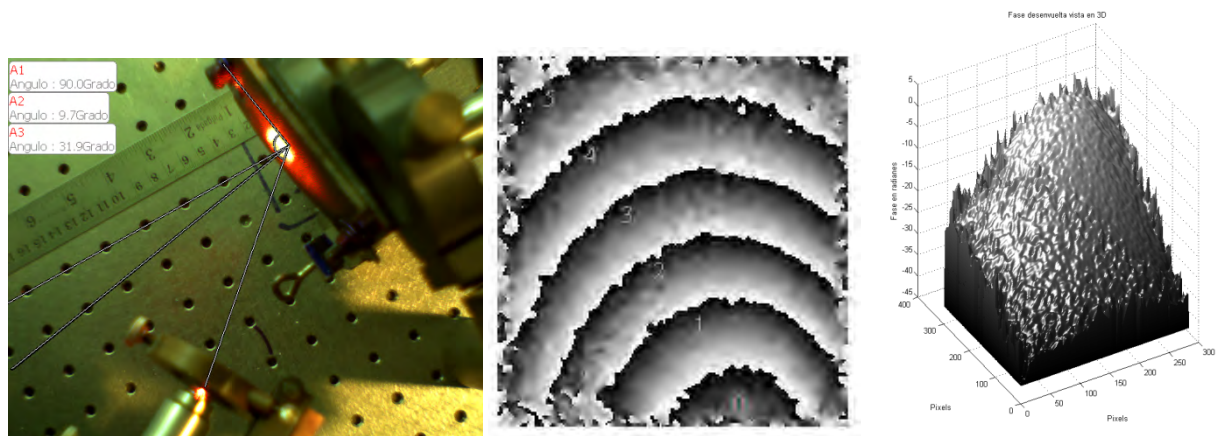


Figura 5- 11. (a) Medición mediante software de procesamiento de imágenes de los ángulos definidos en el sistema óptico. (b) Holograma resultante de fase al haber introducido una deformación pura fuera del plano (Δz) en el punto 0. (c) Diagrama de demodulación de fase.

En la figura 5-11-(a) se representa esquemáticamente la distribución de los elementos usados en el sistema óptico para estudiar una deformación pura fuera del plano. Además se muestran los ángulos medidos con la ayuda de un software con capacidades de medición sobre imágenes. En el holograma de fase (b), el punto indicado como orden 0 se corresponde con el punto de apoyo del extremo móvil del tornillo micrométrico. En este diagrama pueden definirse un total de seis franjas correspondientes a un desplazamiento (Δz) desconocido.

En la figura (c) se muestra el diagrama de fase demodulada, en el cual es posible determinar la variación total de fase sufrida por la superficie bajo estudio, en este caso 35 radianes.

Siendo el ángulo de observación $9,7^\circ$ y el de iluminación de $31,9^\circ$ de la ecuación 2-45 se puede definir la deformación máxima como:

$$\Delta z = - \frac{5 \times 632,8 \text{ [nm]}}{(\cos(9,7^\circ) + \cos(31,9^\circ))} = \frac{3164 \text{ [nm]}}{0,9857 + 0,8498} = 1,72 \text{ }\mu\text{m}$$

Evidentemente la determinación del vector de desplazamiento en este caso particular, resulta sumamente simple y otorga un alto nivel de precisión sobre la medición. Sin embargo no podemos definir si el desplazamiento fue en dirección positiva o negativa de z . En este caso nuevamente nos encontramos con la imposibilidad de conocer el sentido de la deformación, tal como sucedía en holografía convencional.

3. Aplicaciones de la HID en ensayos no destructivos.

3.1. Análisis cualitativo.

3.1.1. Dilatación aplicada a la detección de grietas en procesos de plaquado por láser.

Probeta N° 1:

En el Capítulo III se usó el estudio cualitativo de la HI para la localización de grietas y tensiones residuales sobre probetas las cuales habían sido recubiertas mediante plaquado láser.

Aquí se presenta la realización de un ensayo similar sobre la muestra N°1 (corte transversal del cordón depositado) pero mediante la aplicación de la HID. El objetivo es buscar concordancias entre ambos métodos con el fin de ir delineando los límites y ventajas de esta técnica.

Al igual que en los casos precedentes, se utilizó el esquema de HID en línea. Dado el tamaño de la pieza, la cámara fue ubicada a 30 cm del objeto, utilizándose la misma relación de haces de objeto y referencia. El esquema óptico utilizado corresponde al mostrado en la figura 2-33.

Este esquema permitió obtener imágenes de amplitud de muy buena resolución con un bajo nivel de ruido speckle.

Un total de 18 hologramas fueron capturados, separados por intervalos de temperatura de 1°C .

A diferencia de la HI, la captura de estos se realizó en una sola secuencia.

Los resultados de los HID, mostraron imágenes sumamente definidas, con franjas similares a las obtenidas por HI.

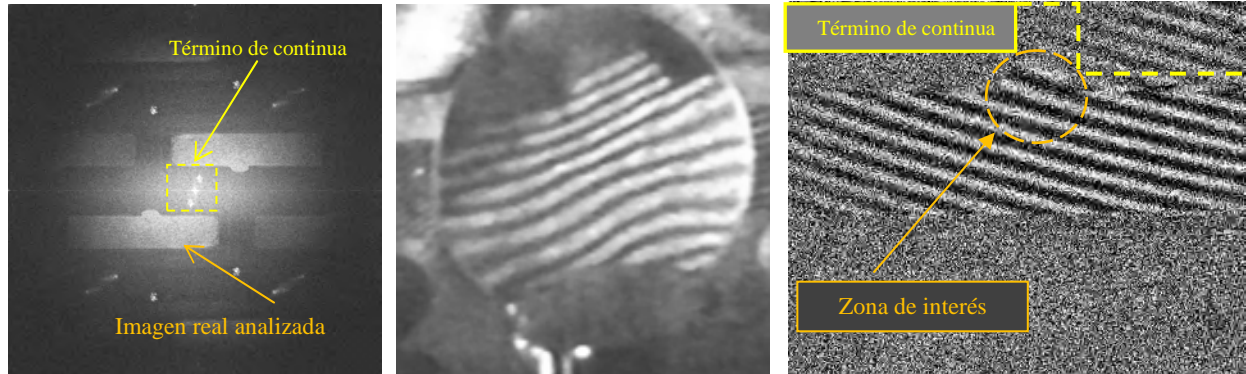


Figura 5- 12. (a) Holograma digital de amplitud. (b) HI para un intervalo de temperatura de 3°C . (c) HID de fase sin filtrado correspondiente a un intervalo de temperatura de 8°C .

La diferencia fundamental desde el punto de vista metodológico fue la utilización de una lente, que a forma de lupa permitió la magnificación del objeto (HI). Como puede verse en HID no es necesaria la utilización de la lupa para obtener la magnificación de la imagen. Como se expuso en el Capítulo IV, la HID presenta un aumento lateral en función del esquema óptico, pero además siempre existe la posibilidad de manejar el tamaño de la imagen digital como se muestra en la figura 5-13.

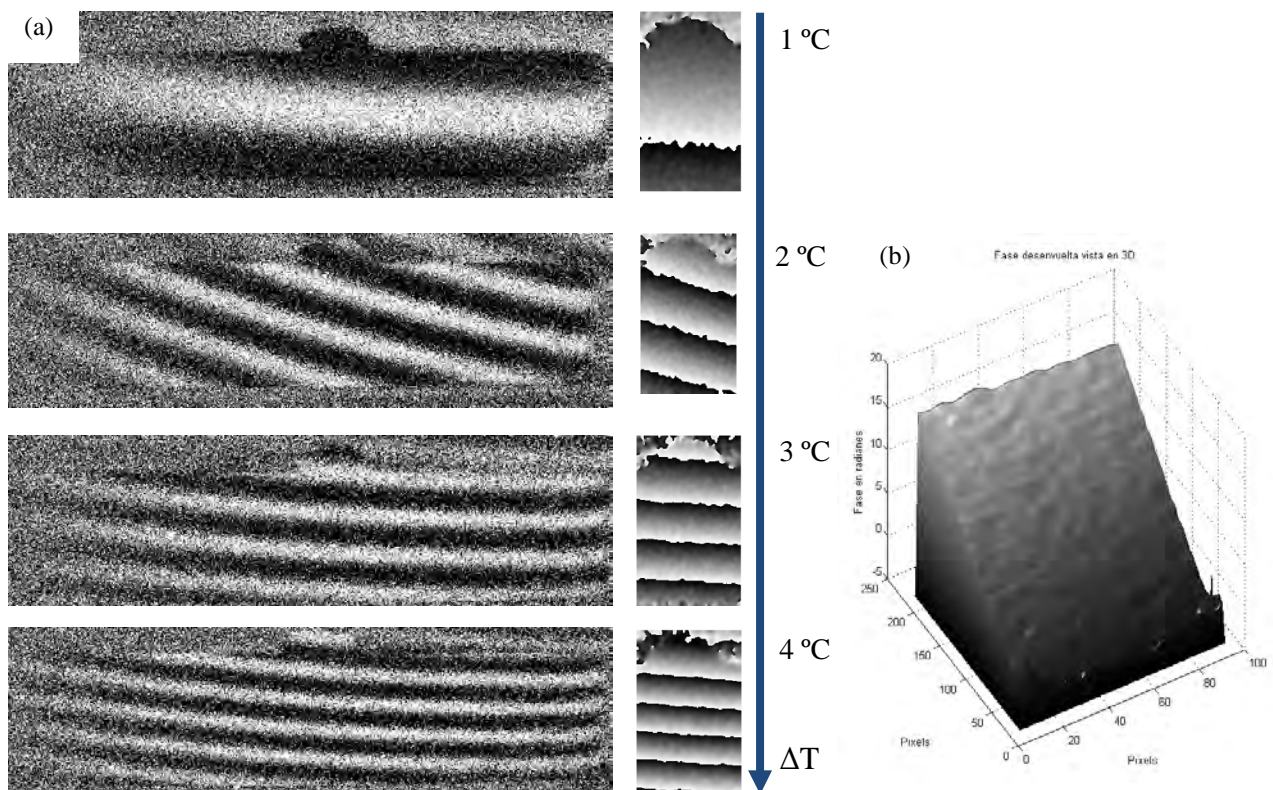


Figura 5- 13. (a) Secuencia de HID que muestra la distribución de las franjas para cada intervalo de temperatura. (b) Diagrama de fase demodulada para 2°C donde se aprecia la uniformidad en la variación de la fase.

La ubicación de las franjas muestra una prevalencia de la deformación pura en z . La distribución es homogénea al igual que las observadas mediante HI. El diagrama de fase demodulada no muestra indicios de variaciones abruptas de fase en la zona de coyuntura entre la probeta y el material depositado.

Queda en evidencia que durante el proceso de deposición no se formaron grietas en la zona seleccionada para estudio. Además no se observan tensiones residuales o deformaciones debidas a coeficientes de dilatación diferentes.

Si bien los algoritmos aplicados para la reconstrucción de la imagen de amplitud y de fase no muestran evidencia alguna de la existencia de fisuras, se decidió la aplicación secuencial de los algoritmos de demodulación de fase con el fin de asegurar la inexistencia de fisuras. En total se realizaron 17 diagramas de demodulación, correspondientes a los 18 hologramas capturados tomando como referencia el holograma 18 (40 °C).

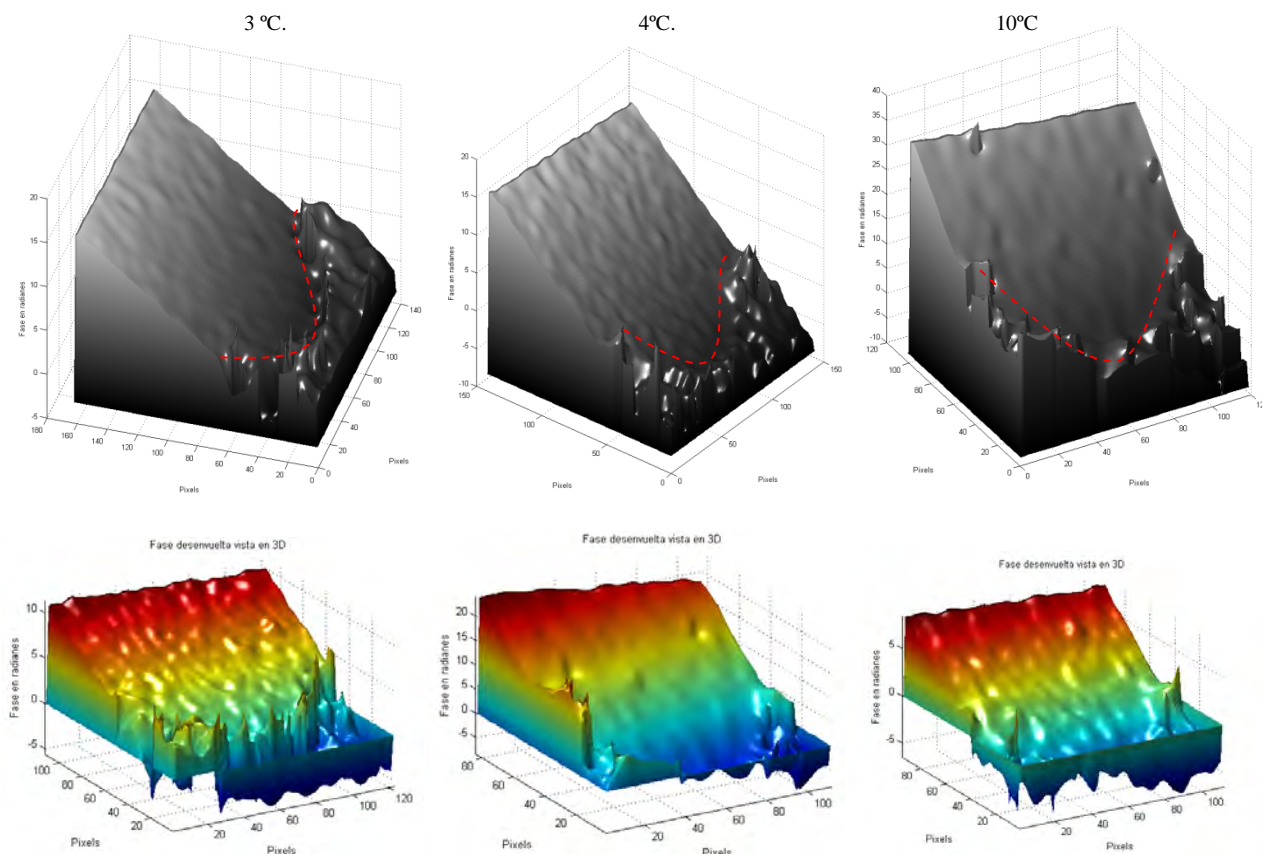


Figura 5- 14. Tres de los diagramas de fase demodulada tomados en la zona central de la probeta, correspondientes con la deposición del material. Los gráficos en color corresponden al método de guiado de calidad y en gris al método Brunch-Cut. En líneas de puntos rojos se indican en forma aproximada el límite del objeto sobre el cordón depositado.

De los diagramas de fase demodulada, realizados por dos métodos diferentes, es evidente que no se registran fisuras en la coyuntura del material.

Probeta N° 3.

En los ensayos mostrados en el Capítulo III solamente fueron estudiadas las muestras 1 y 2. Una tercera muestra con serias deficiencias en el proceso de plaqueado, cuando se intentaron realizar cordones sucesivos y paralelos, fue dejada de lado en el estudio por HI por el tamaño de las gariteas presentes en esta.

La HID aporta nuevas herramientas para el estudio de este tipo de fracturas, en particular los diagramas de fase demodulada. El interés particular de aplicar esta herramienta radica en definir las características de los diagramas cuando se conoce de antemano el tipo y tamaño de la grieta.

En la probeta N° 3 fueron realizadas un total de 3 series con diferentes intervalos de temperatura. La primera serie se realizó entre 38° C y 28 °C. La segunda con un rango mayor de temperatura, desde los 54 °C hasta los 30 °C. La última desde 40 °C hasta 34 °C.

Dado el tamaño de la probeta, extremadamente grande para este esquema (figura 5-15), se procedió al pintado de la zona sin interés con un color absorbente y con blanco la zona de deposición. Así, la cámara pudo ser posicionada dentro de los 30 cm del objeto manteniendo el esquema óptico.



Figura 5- 15. Imagen que muestra la zona depositada en cordones sucesivos sobre la probeta N° 3.

El estudio se comenzó mediante la observación con lupa estereoscópica con el fin de localizar fisuras en la zona de deposición. Como resultado se pudo encontrar al menos una fractura en la parte superior de la probeta. Además, pudo ser identificada una fisura que se desarrolló verticalmente durante el proceso de enfriamiento del recubrimiento. Claramente esta segunda probeta presenta defectos de importancia en el proceso de deposición de materiales, que pueden ser claramente identificados mediante el uso de una lupa o microscopio metalográfico.

En la figura 5-16 se muestran fotografías con diferentes niveles de aumento correspondientes a la zona bajo estudio. El material ya se encuentra recubierto con pintura, con el fin de mejorar la calidad de la imagen holográfica resultante. Este proceso de pintado no afecta el desarrollo del análisis mediante HID, ya que como puede observarse la pintura no llega a cubrir totalmente la fisura.

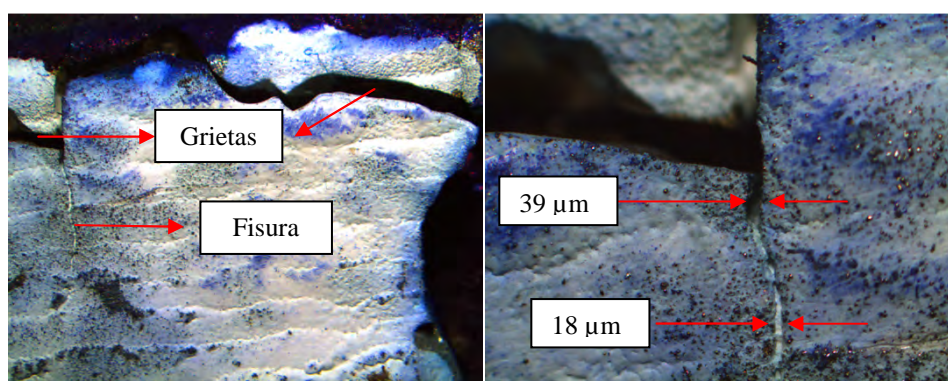


Figura 5- 16. Fotografías obtenidas con el uso de lupa estereoscópica con aumentos de X10 y X22. Puede observarse la presencia de una grieta y una fisura.

Realizadas mediciones del ancho de la rendija, usando el programa Motic Image Plus, se pudo determinar que la fisura en su parte superior posee un ancho de 39 μm y en su parte inferior un tanto menor, alcanzando los 18 μm.

Probeta N° 3, primera serie.

En la primera serie se realizaron un total de diez hologramas con una separación térmica de 1°C, con una temperatura máxima de 38 °C. La temperatura fue medida mediante una termocupla K en un termómetro Sonel DIT-500.

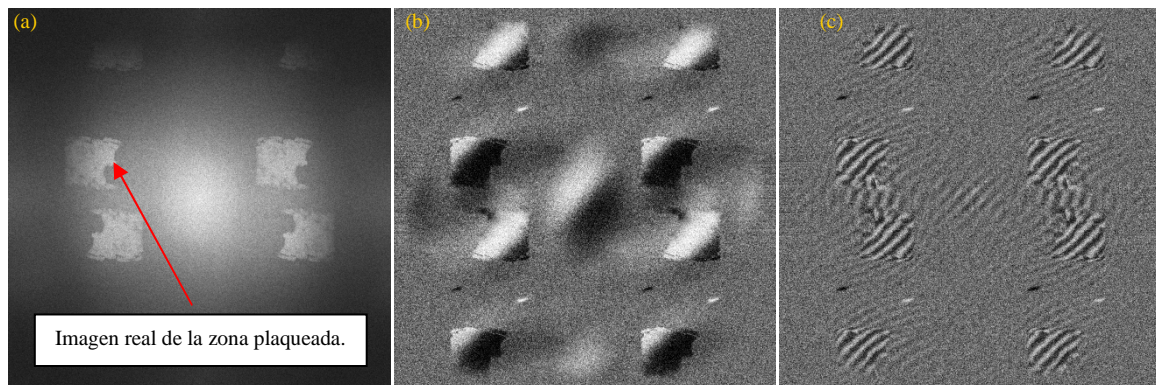


Figura 5- 17. (a) Holograma de amplitud con la totalidad de los gemelos. (b) HID de fase con un $\Delta T = 1^\circ\text{C}$. (c) HID de fase para un $\Delta T = 7^\circ\text{C}$.

De la primera serie, no fue posible distinguir en forma inmediata señales de fracturas o fisuras, a partir del análisis de la distribución de franjas resultantes de los HID. Si se observa con mayor detalle la figura 5-17 (c), puede verse que las franjas cambian de espesor y dirección en la zona donde se encuentra presente la grieta horizontal, ampliada en la figura 5-18.

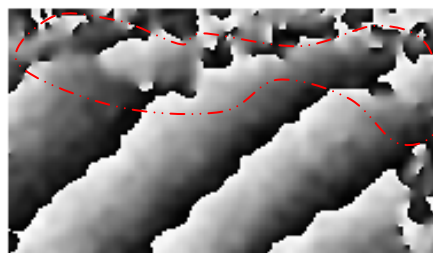


Figura 5- 18. Ampliación posterior al filtrado de la imagen de fase de la zona donde se encuentra la grieta superior.

Circunscripta en línea roja se puede apreciar que el patrón de franjas se torna difuso lo cual puede indicar la presencia de grietas o fracturas en el material [Karray, 2012]. Sin embargo, comparado con el patrón de la figura 3-34 (b) los resultados no son concluyentes.

Como herramienta auxiliar en el análisis cualitativo, se decidió la aplicación del algoritmo de demodulación de fase sobre el total de la zona de estudio. Nuevamente, los resultados obtenidos no mostraron indicios de la presencia de grietas y fisuras evidentes. En todos los casos la variación de fase se presenta uniforme sobre la superficie del recubrimiento.

Sin embargo existen pequeñas ondulaciones en la superficie del diagrama de fase que bien podrían estar relacionadas con las grietas o la fisura. En la figura 5-19 se muestran en líneas de puntos la zona donde se encuentra la fisura y en líneas de guiones se muestran las fisuras.

Las zonas que se encuentran sobre el plano del diagrama de fase corresponden a patrones de speckle de fase aleatoria que se ubican por fuera de la zona plaqueada.

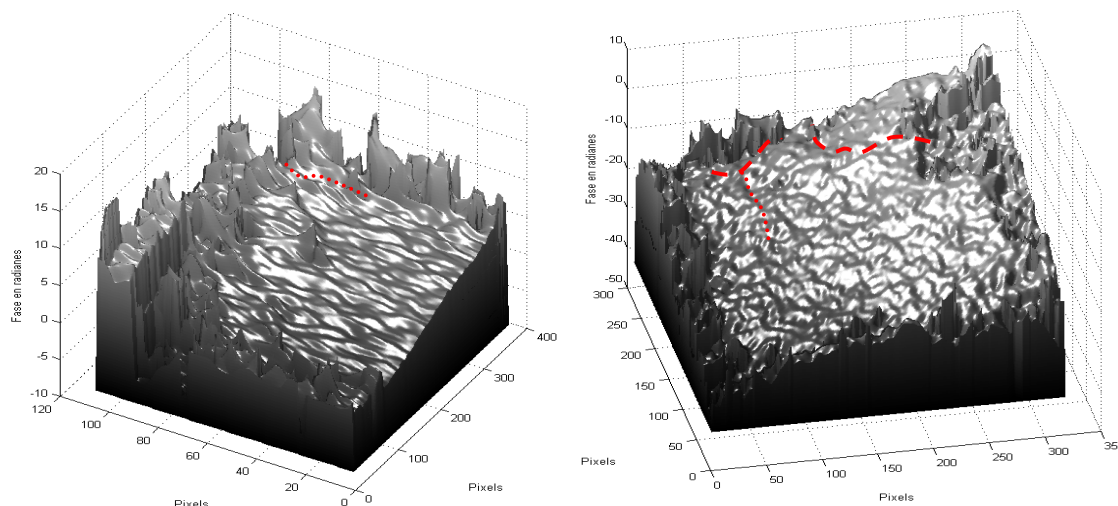


Figura 5- 19. (a) Diagrama de fase demodulada para $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$. (b) Diagrama de fase demodulada para $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$. En líneas punteadas se muestran las zonas en las cuales debería visualizarse las grietas y a fisura.

Segunda serie.

En la segunda serie se realizaron un total de seis hologramas, excitados térmicamente con una diferencia de temperatura de 4°C entre imágenes. La temperatura superior se elevó hasta los 54°C , reduciéndose hasta 30°C para el holograma número 6-3. La imagen de amplitud resultó igualmente definida con la posibilidad de detectar claramente la zona de interés. Nuevamente las franjas de interferencia no mostraron la presencia de la fisura, si la existencia de la grieta y de la zona de quiebre del material depositado.

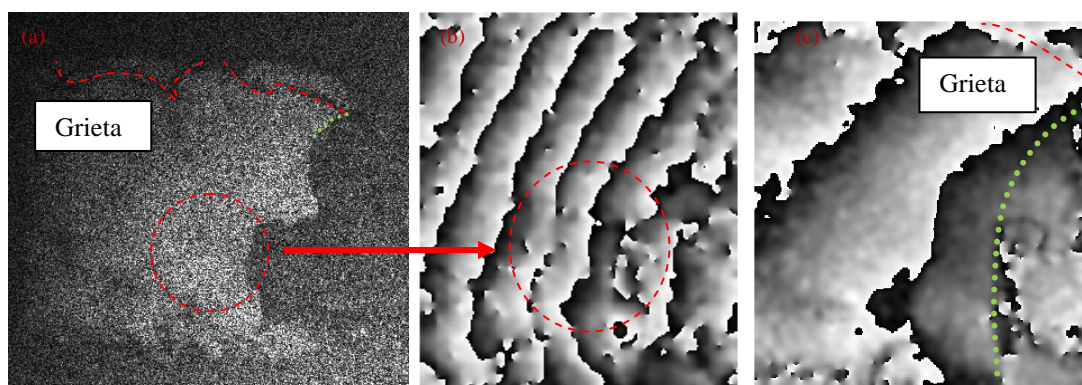


Figura 5- 20. (a) Holograma de amplitud (b) HID filtrado después de 12 iteraciones de filtrado, $\Delta T = 12^{\circ}\text{C}$. (c) HID de fase para un $\Delta T = 4^{\circ}\text{C}$.

En la figura 5-20, se muestran diferentes zonas de interés como resultado del proceso de contracción del material. Claramente puede ser apreciadas discontinuidades en la distribución de franjas en los extremos superiores de las imágenes de fase filtrada, coincidentes con la presencia de la grieta de fractura. Sin embargo no es posible discriminar la presencia de la fisura de excursión vertical.

En la 5-20 (b) circunscripta se observa una discontinuidad notable en el patrón si bien no corresponde a una zona en la cual se observarían fracturas o desprendimientos con la lupa. Un deficiente proceso de fusión entre el sustrato y el depósito puede ser el origen de esta imagen.

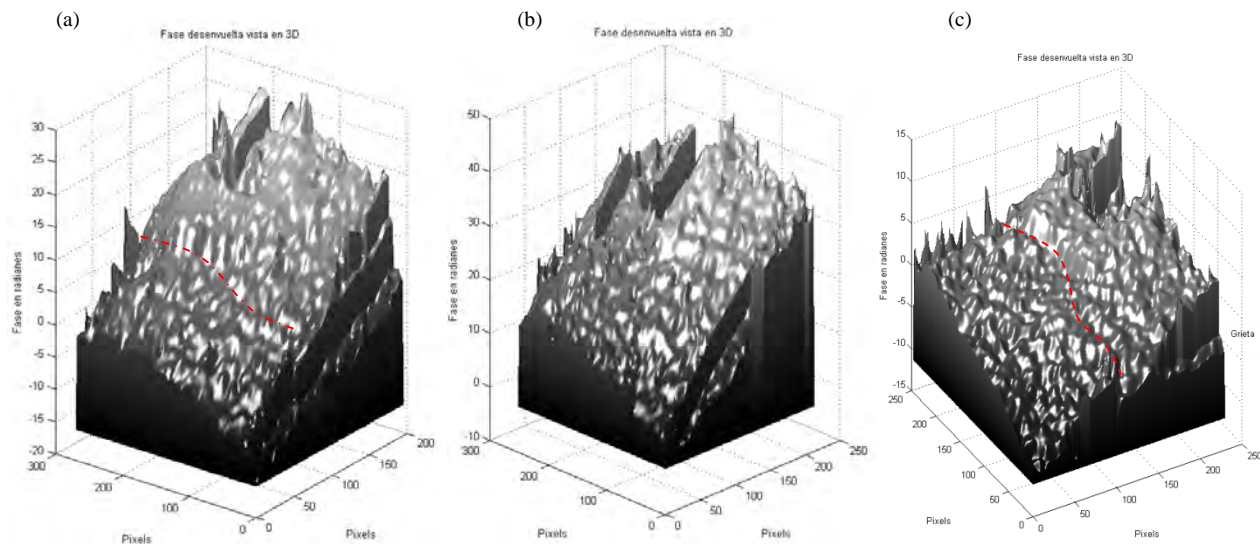


Figura 5- 21. Diagramas de fase demodulada para diferentes intervalos de temperatura, en todos los casos puede ser definida la presencia de la grieta.

En los diagramas de fase demodulada de la figura 5-21 se pueden apreciar discontinuidades notables en las zonas correspondientes a la grieta superior, las cuales indicarían su presencia. En el primer y tercer diagrama de fase existe una zona central con una leve depresión que podría estar asociada con la fisura vertical, indicada con línea de puntos rojos.

Si magnificamos la zona superior en el diagrama de fase nos encontramos con la fractura perfectamente definida. En la figura 5-22 se aprecia en detalle este hecho.

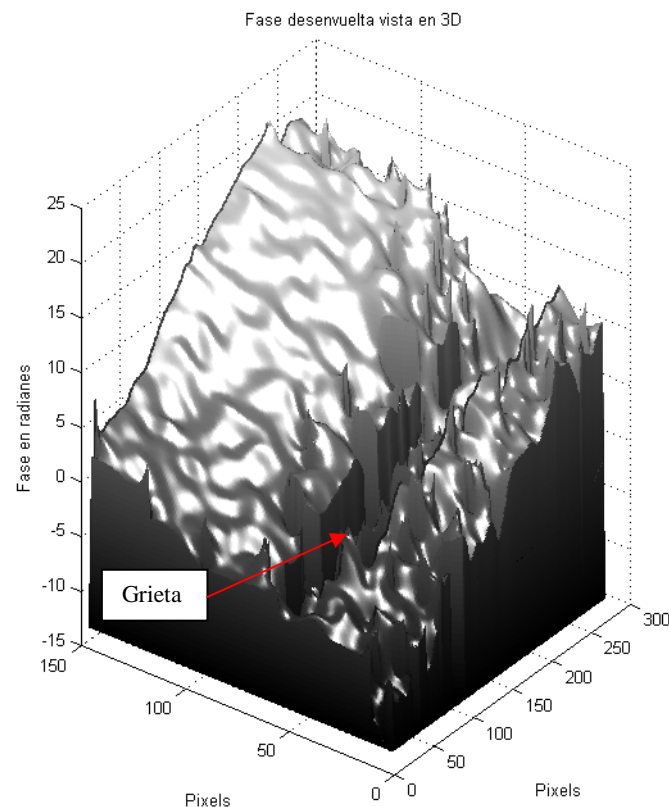


Figura 5- 22. Diagrama de fase demodulada correspondiente a la zona superior de la zona depositada.

Tercera serie.

La metodología aplicada fue similar a las precedentes, buscando mejorar la calidad de la imagen mediante la reducción del nivel de speckle. Los resultados obtenidos fueron totalmente coincidentes con los precedentes.

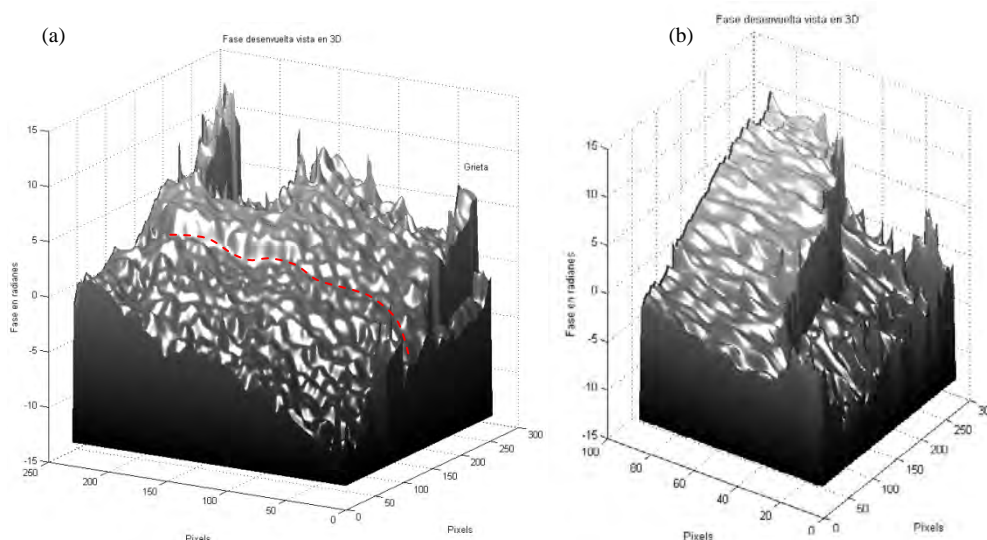


Figura 5- 23. Diagramas de fase demodulada para diferentes intervalos de temperatura, limitado a la zona de existencia de la grieta.

Se pudo definir con certeza el recorrido de la grieta superior. En la figura 5-23 (b) se puede ver el diagrama de fase demodulada, obtenido excluyendo la parte inferior de la zona de deposición. En el otro diagrama, nuevamente puede suponerse que la depresión marcada con líneas de punto se encuentra asociada a la fisura. Sin embargo no es posible identificarla con la misma precisión que como fuera realizado en HI.

Discusión de los resultados.

Dos muestras diferentes, una resultante del corte transversal de una probeta de acero AISI 304 sobre la cual fuera depositado un hilo de recubrimiento y una segunda probeta del mismo material y con un proceso de recubrimiento similar, pero en este caso sobre un área de sección cuadrada integrada por varios cordones en paralelo. Fueron analizadas cualitativamente con el objetivo de relacionar fisuras y grietas con la información obtenida de las imágenes de fase y de los diagramas de fase demodulada. En el primero de los casos no fue posible identificar ningún tipo de defecto encontrándose resultados totalmente coincidentes entre la HID y la HI.

En la segunda probeta, habiendo sido identificadas grietas mediante el uso de una lupa estereoscópica se pudo definir con precisión como se las relaciona con los diagramas de fase demodulada.

El estudio de la fisura vertical con un ancho comprendido entre $39\text{ }\mu\text{m}$ y $18\text{ }\mu\text{m}$ no permitió obtener los resultados esperados.

Si se extienden los resultados obtenidos mediante HID sobre la probeta N° 3 a la probeta N° 1, no podemos asegurar que no existan fisuras menores a $40\text{ }\mu\text{m}$ en esta. Solo el HI precedente, puede dar certeza de esta situación. Evidentemente que solo la aplicación de ambos ensayos es capaz de asegurar resultados en este tipo de análisis.

3.1.2. Detección por interferometría holográfica digital de fisuras en una tapa de cilindros

Los resultados del estudio cualitativo mediante HID de tres muestras obtenidas de ensayos en procesos de plaqueado por láser de potencia, indicaron la imposibilidad de detección de pequeñas fisuras. Uno de los argumentos que pueden justificar este resultado, puede estar relacionado con el

elevado nivel de speckle propio de la zona de interés, que tiene su origen en el alto grado de rugosidad resultante del propio proceso de plaqueado.

A partir de esta situación se propuso un segundo ensayo en el que la superficie bajo estudio presentara un nivel de rugosidad mucho menor.

Una tapa de cilindro de fundición, la cual fuera desechada por una fisura en su circuito de refrigeración, fue utilizada para la realización de un segundo experimento. Dada la longitud y peso de la misma se decidió cortarla en secciones que permitieran ser montadas en el esquema holográfico dentro del laboratorio. Evidentemente, esta práctica no puede ser considerada como ensayo no destructivo, sin embargo el objetivo del experimento lo justifica.

La sección resultante contenía una fractura conocida sobre la que se trabajó para la obtención de los HID.

Un total de tres series de HID fueron realizadas con el fin de documentar la existencia de esta fisura.

El mismo esquema usado en ensayos anteriores fue aplicado a este. Inicialmente se calentó la pieza a temperaturas cercanas a los 60 °C. Sin embargo, este valor de temperatura incidió negativamente en el desarrollo de las experiencias como consecuencia de la masa del objeto bajo estudio. La convección natural de la pieza ubicada bajo el filtro espacial del haz de referencia, introdujo cambios en éste, así como también en el índice de refracción del aire haciendo imposible la obtención de los hologramas. Como solución se decidió reducir los intervalos de temperatura, no calentando la pieza por encima de 10 °C de la temperatura ambiente.

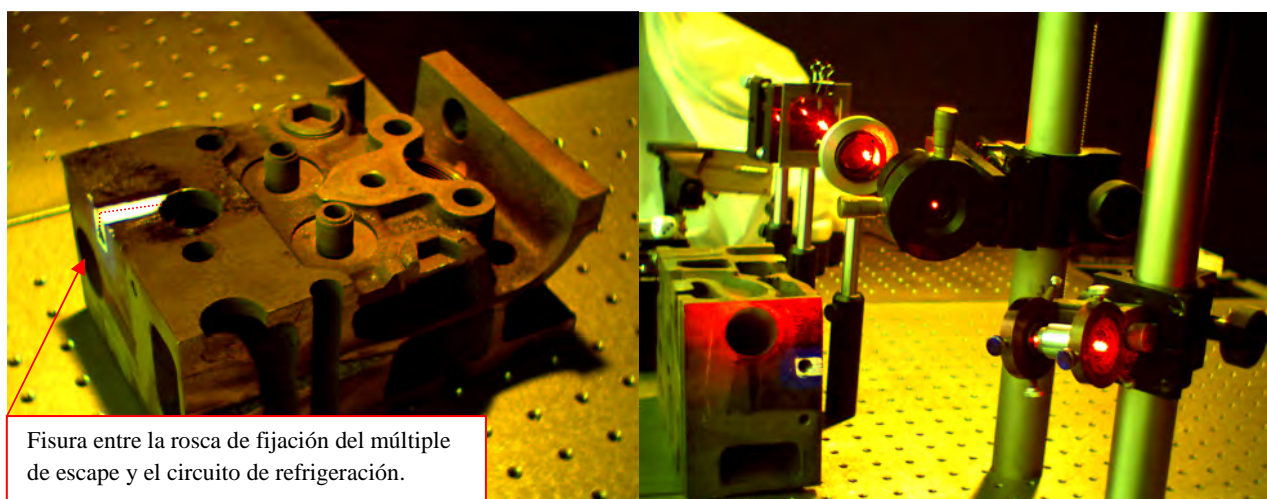


Figura 5- 24. Sección de la tapa de cilindros usado para el análisis y la pieza montada en el esquema de holograma en línea de Gabor durante el proceso de ubicación del objeto, de acuerdo con el sistema de transformación de coordenadas documentado en el Capítulo IV (Tercera serie).

En la figura 5-24 se observa la complejidad del diseño de la tapa de cilindros. En blanco se encuentra la zona de interés, mientras que el resto de la tapa fue pintado de color negro mate, con el fin de absorber la luz proveniente del haz del objeto.

Primera serie.

En la primera serie se analizó la cara superior de la tapa de cilindros, en el área comprendida entre el lateral izquierdo y la abertura circular del canal de refrigeración. En este caso, dadas las dimensiones de la tapa de cilindros, no fue posible el estudio de las dimensiones mediante lupa estereoscópica, desconociéndose el tamaño de la fisura.

Se tomaron un total de 7 hologramas con un intervalo de temperaturas descendente, con un intervalo de tiempo entre imágenes de 30 segundos (no se realizó medición de temperatura).

Los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 5-25.

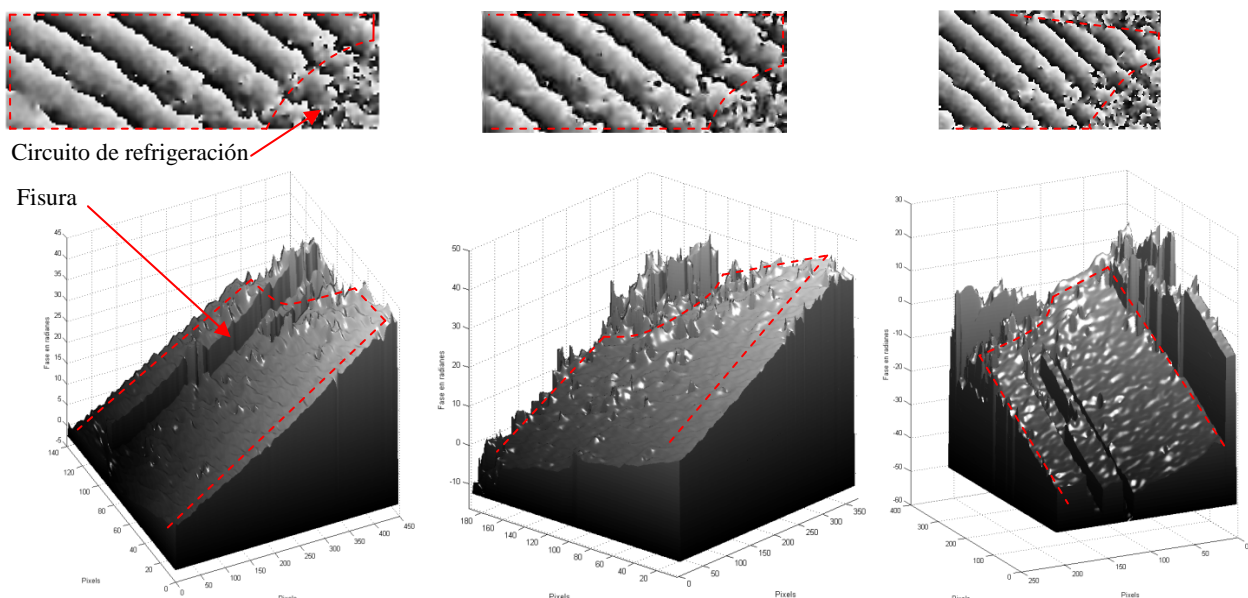


Figura 5- 25. HID correspondiente a la secuencia 0-2, 0-3, 0-4. En la parte superior franjas del HID filtradas, en la parte inferior diagramas de demodulación de fase.

Los resultados obtenidos de la primera serie, muestran que en dos de los diagramas de fase (0-2 y 0-4) se observan discontinuidades notables en la distribución de fase, con la misma posición y en la dirección de la existencia de la grieta. El diagrama correspondiente al HID 0-3 se encuentra por fuera de la zona donde se desarrolla la fisura en el material.

En los tres casos, el método de obtención del diagrama es el mismo, BranchCut. Al HID 0-2 se lo repitió oportunamente pero bajo el método de Guiado de calidad. En este segundo caso no fue posible encontrar esta discontinuidad en el diagrama de demodulación.

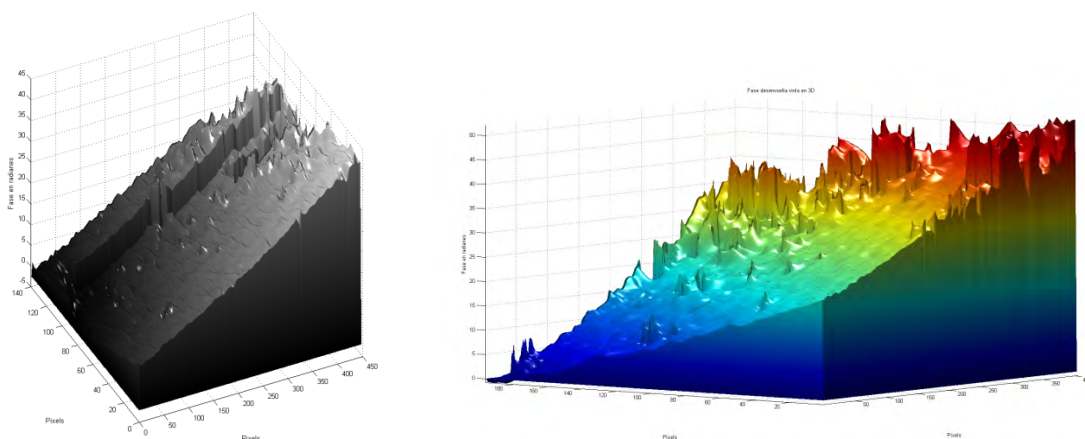


Figura 5- 26. Diagramas de demodulación de fase obtenidos por el método BranchCut y el método de Guiado de calidad.

Segunda serie

Con el fin de obtener un mayor tamaño de la grieta, que permitiera definir con mayor certeza la existencia de la misma y así contrastar los resultados de la primera serie. Se forzó un desplazamiento del material. Esto se realizó mediante un fuerte golpe lateral en la pared de la tapa de cilindros. Además, mediante el uso de una herramienta de corte se produjo una hendidura con el fin de abrir la fisura en su comienzo.

Las deformaciones introducidas en el objeto son claramente visibles en el holograma de amplitud de la figura 5-27.

La sección de la tapa de cilindros se ubicó nuevamente, en la misma posición que fuera definida en la primera serie.

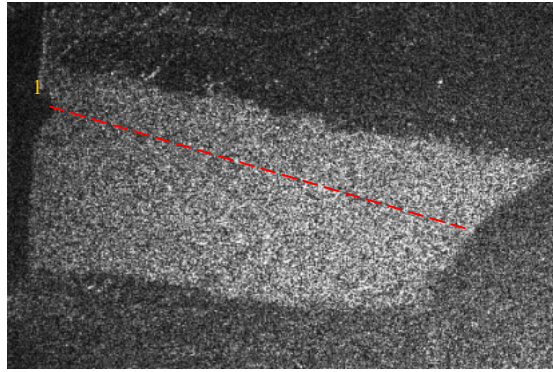


Figura 5- 27. Holograma de amplitud donde se muestran con el número 1 la hendidura y en línea de puntos la dirección de la fisura.

Un total de 10 hologramas fueron realizados para su posterior análisis. El intervalo de temperatura se extendió desde 40°C hasta los 34°C.

Durante los sucesivos procesos de reconstrucción se dio prioridad a la zona en la que se había previamente ubicado la posición de la fisura. Al igual que en la primera serie, los resultados obtenidos no indican en todas las reconstrucciones una discontinuidad en el diagrama de fase. En el caso de los diagramas mostrados en la figura 5-28, claramente se puede observar que en el caso de del diagrama realizado por el método de guiado de calidad, si bien es posible detectar la hendidura donde comienza la fisura no es posible localizar a esta. En el método Brunch Cut es evidente que el diagrama no se corresponde con la zona de interés dado que no se puede localizar la hendidura ni la abertura del circuito de refrigeración. Este problema guarda relación con el mecanismo de selección de la zona de interés en el algoritmo de reconstrucción.

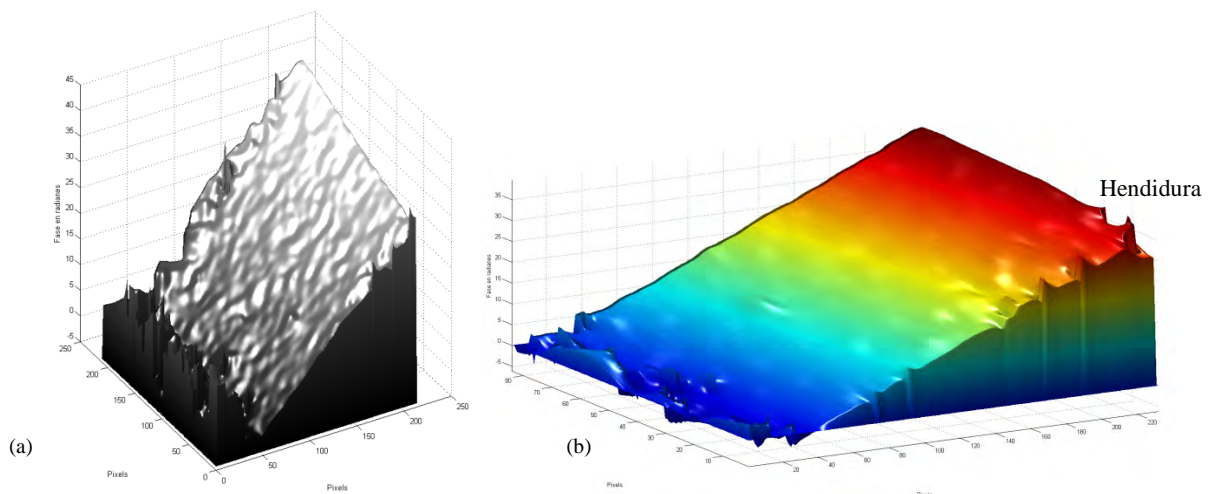


Figura 5- 28. Diagrama de fase de la HID de los hologramas 4-6 y 4-8, (a) reconstrucción por el método Brunch Cut. (b) Reconstrucción por el método de guiado de calidad.

Por otra parte, a pesar de haberse producido una alteración de la superficie del material, no es posible observar tensiones residuales.

De la comparación de ambas reconstrucciones vemos que el método de guiado de calidad, tiende a suavizar notablemente el nivel de ruido speckle, dando un diagrama mejor filtrado. Sin embargo es de suponer que este mismo proceso de filtrado pudiera llegar a afectar parte de la información contenida en el HID. En la figura 5-29, se repiten los diagramas, pero ahora entre los hologramas 5-0 y 10-0. En este caso puede observarse la discontinuidad en ambos diagramas.

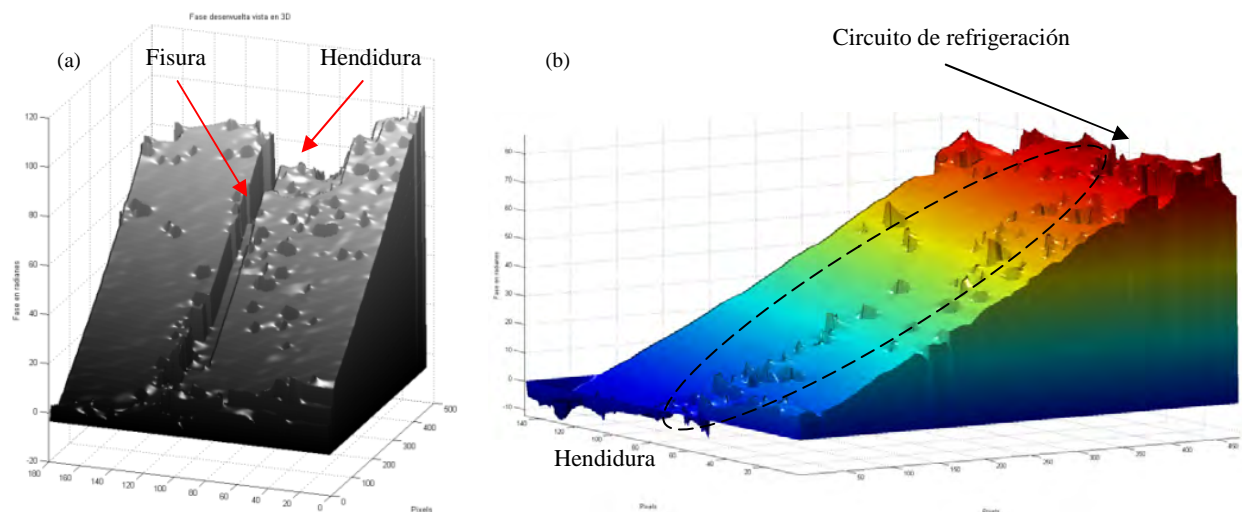


Figura 5- 29. Diagrama de fase de la HID de los hologramas 5-0 y 10-0, (a) reconstrucción por el método Brunch Cut. (b) Reconstrucción por el método de guiado de calidad.

Por el método de Brunch Cut claramente se puede apreciar el salto de fase introducido por la fisura, pero es también visible en el otro método en el cual existen una serie de picos alineados en la dirección de la fisura. En este caso ambos métodos aportan igual nivel de información, siendo mucho más claro el primero de ellos.

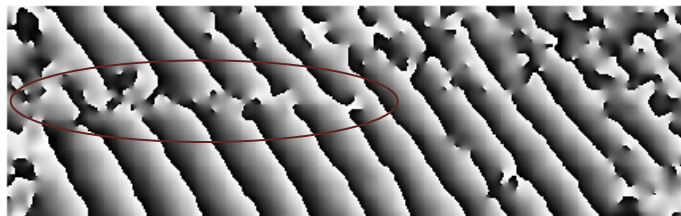


Figura 5- 30. Diagrama de interferencia resultante de los hologramas 50-100.

En el diagrama de interferencia resultante del HID entre estos dos últimos hologramas es posible observar una zona en la que queda en evidencia una discontinuidad de las franjas de interferencia. Estas discontinuidades podrían estar relacionadas directamente con la posición de la fisura en el material. En HI, este tipo de fractura es claramente visible tal como lo indica la figura 3-34 no así en HID donde se requiere de cierta experiencia del personal que realiza el análisis.

Tercera serie.

En la tercera serie, se procedió con el análisis del lateral de la tapa de cilindros. Esta cara es aquella sobre la cual se realizó mediante un elemento de corte una marcada deformación sobre la fisura. El objeto de este análisis es corroborar lo anteriormente visto en la existencia de grietas en las probetas de plaquero. La cara lateral, en la cual se ensanchó notablemente la fisura, presenta características similares a las de la probeta N° 3. Pero con la ventaja de presentar un menor nivel de ruido speckle dada la menor rugosidad.

Se realizaron un total de 6 hologramas separados entre sí por un intervalo de temperatura de 1°C.

En la figura 5-32 es posible observar la imagen de amplitud obtenida de la zona bajo estudio, en la se nota la hendidura causada por el esfuerzo mecánico aplicado. La imagen de fase no muestra a priori información relacionada con la grieta, existiendo sobre esta una franja oscura continua. Como alternativa se puede observar además, la imagen de amplitud y fase combinadas, en la que sí es posible observar alguna perturbación en la homogeneidad sobre la fisura.

Siguiendo la metodología de análisis precedente, se realizaron diagramas de demodulación de fase por el método Brunch Cut. El resultado de estos gráficos dejó claramente en evidencia la existencia de las grieta y de la fisura en el material, tal como se muestra en la figura 5-33.

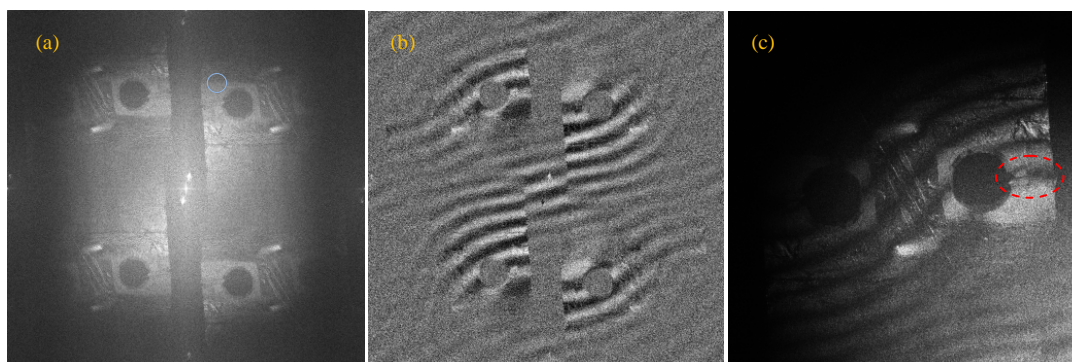


Figura 5- 31. (a) Imagen de amplitud. (b) Imagen de fase entre los hologramas 1-6. (c) Hologramas de amplitud y fase combinadas.

Realizados los gráficos de fase demodulada, la discontinuidad en las franjas observadas en el holograma de amplitud y fase combinados, se hicieron evidentes durante el filtrado de las franjas con el filtro seno-coseno y posteriormente en los gráficos tridimensionales. Evidentemente la existencia de la grieta generada por deformación mecánica se hace visible con un gran salto de fase, pero a su vez se encuentra claramente definida la fisura debida a la fractura de la tapa de cilindros.



Figura 5- 32. Diagrama de fase luego de aplicar filtro seno-coseno de los interferogramas 0-5 y 0-1.

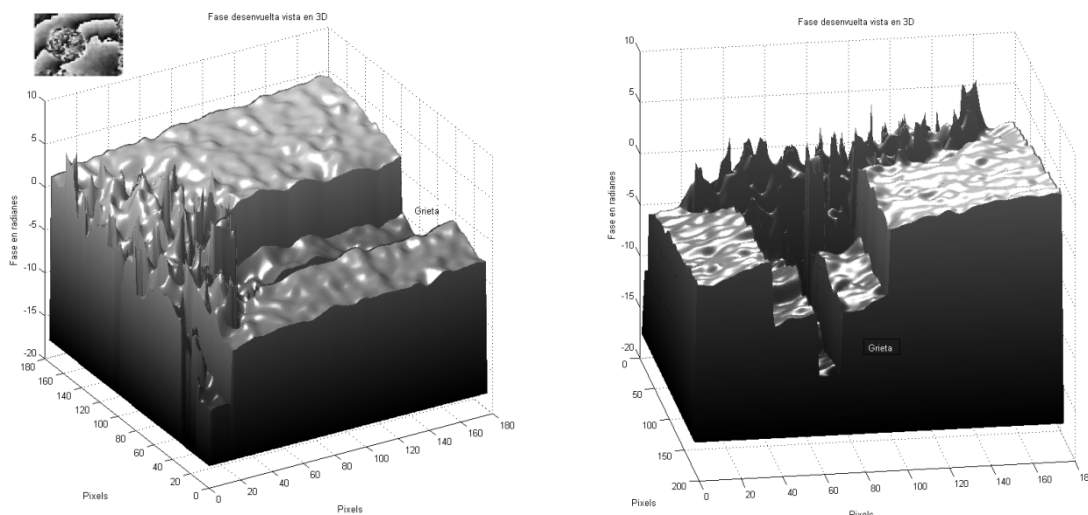


Figura 5- 33. Diagramas de fase demodulada correspondientes a la zona de interés, obtenidas de la HID de los hologramas 0-5 y 0- 1

Una observación particular debe realizarse en los diagramas de fase demodulada y es que en el método Brunch Cut la existencia de grietas o fisuras se muestra como una discontinuidad en la fase con saltos que podríamos definir como discretos. No existe una variación suave de la fase como podría esperarse. En las publicaciones de referencia se observan situaciones similares con iguales resultados [Maaboud, 2010]. Estos saltos bien pueden obedecer limitaciones en la posibilidad de seguir la fase en el algoritmo de demodulación, pero sin dudas se encuentran presentes cuando existe una discontinuidad en la superficie bajo estudio.

3.1.3. Aplicación de la interferometría holográfica como método de detección de defectos en las soldaduras usadas en estructuras de acero nervado.

En el Capítulo III se mostraron los resultados de analizar mediante HI una probeta metalográfica obtenida de una estructura de acero reticulada colapsada. Junto con la probeta fueron entregadas partes de la misma estructura con el fin de ampliar el análisis. Paralelamente en el laboratorio de materiales fueron realizados estudios propios de metalografía. El objetivo de establecer ambas líneas de investigación fue el de contrastar resultados de dos métodos diferentes.

La posibilidad de la existencia de fisuras en las zonas de soldadura fue la principal hipótesis planteada luego que el HI diera como resultado uniformidad en el patrón obtenido en dilatación.

La velocidad de obtención de los HID y el aumento lateral de la imagen, definió el uso de esta técnica por sobre la HI en el resto de las muestras.

Ensayos por HID.

Del total de las muestras obtenidas se seleccionaron cuatro. Dos correspondientes a un corte transversal de una de las barras principales de la estructura. Una correspondiente al corte transversal de la unión en “V” de una de las soldaduras y finalmente un corte longitudinal de idéntica zona de unión.

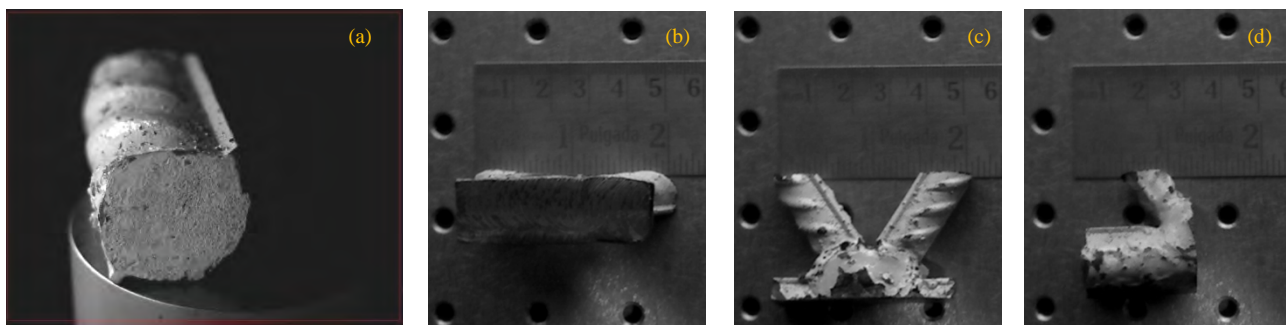


Figura 5- 34 (a) Muestra de barra principal de acero nervado obtenida de la estructura colapsada. (b) Vista inferior del corte longitudinal sobre punto de soldadura. (c) Vista lateral de la zona de soldadura. (d) Muestra en corte transversal de la zona soldadura.

Nuevamente la inducción de la deformación se realizó por temperatura, calentándose los objetos hasta temperaturas de 40 °C y dejándolos enfriar. El esquema óptico no fue alterado respecto de los ensayos precedentes.

Más de 100 hologramas en 24 sesiones diferentes fueron obtenidos para la realización del estudio dando un promedio de 25 hologramas por pieza.

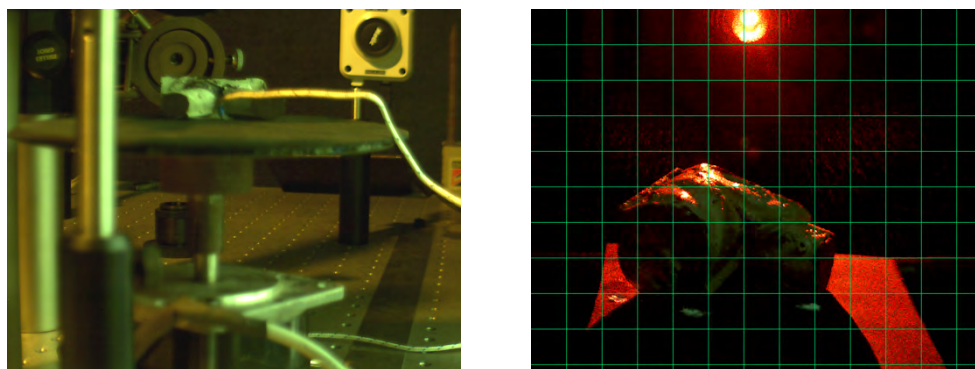


Figura 5- 35. Esquema aplicado en el estudio de las muestras de acero nervado provenientes de una estructura colapsada.

Ensayo de las muestras 1 y 2.

Se realizaron tres series de hologramas con intervalos de temperatura diferentes, de los cuales se obtuvieron las imágenes mostradas en la figura 5-36.

En los más de sesenta hologramas tomados y sus correspondientes HID, no fue posible encontrar indicios de problemas en el material de ambas muestras. En general las franjas que se visualizan muestran una distribución homogénea con ángulos de inclinación que indicarían la presencia de más de un sentido en la deformación (prevaleciendo las deformaciones z o fuera del plano combinadas con las de sentido x).

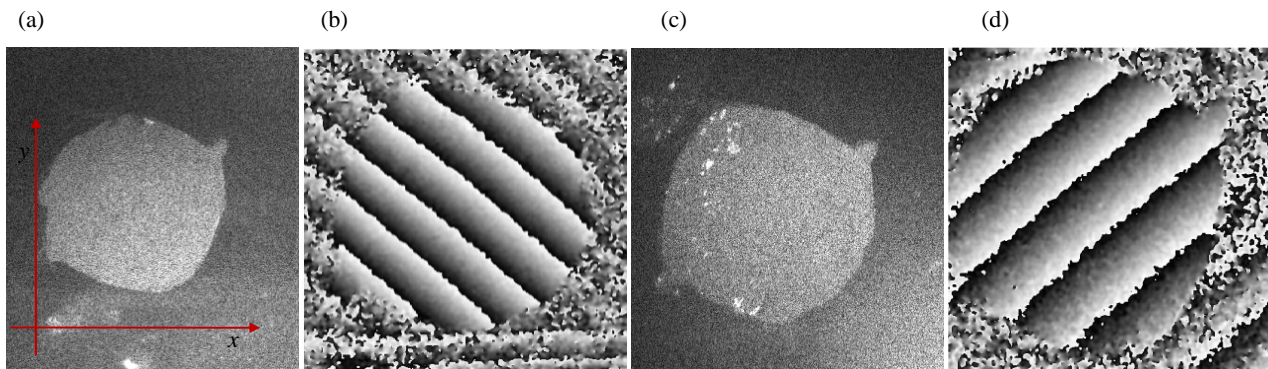


Figura 5- 36. (a) Holograma de la muestra número 1. (b) HID de la muestra número 1. (c) Holograma de la muestra número 2. (d) HID de la muestra número 2.

Al igual que el ensayo realizado mediante HI, el material presenta un comportamiento homogéneo sin indicios de la existencia de grietas o fisuras. Tampoco es posible observar indicios de tensiones residuales.

Ensayo de la muestra 3.

La muestra 3 corresponde al corte transversal de la zona de soldadura. Siendo esta una de las zonas críticas desde el punto de vista de la hipótesis planteada, se comenzó el estudio mediante la observación con lupa estereoscópica. Como resultado y al igual que en el estudio de la probeta N° 3 de plaquero por láser, pudo identificarse la presencia de defectos sobre la superficie. En la figura 5-37 se pueden observar en detalle de la superficie en la zona del corte. Claramente se observa la presencia de una burbuja en el interior del material aportado durante la soldadura. Además, es posible individualizar una grieta vertical que en algunos puntos presenta perforaciones y una posible fisura que se extiende desde la burbuja.

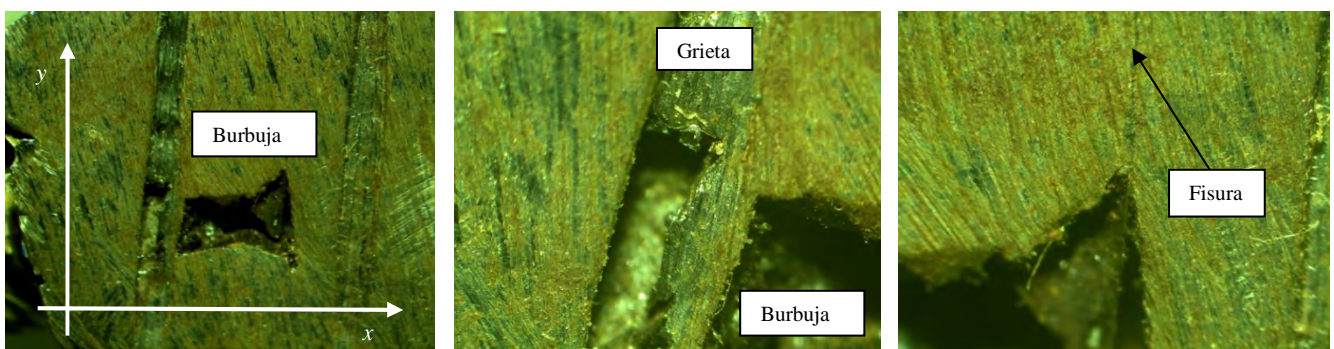


Figura 5- 37. Detalle del defecto localizado en el interior de la zona de soldadura y que podría dar lugar a una falla de la estructura

Un total de 15 hologramas fueron utilizados para el análisis de esta muestra. Si bien en todos los casos se observaron franjas distribuidas uniformemente, fue posible relacionar la existencia de las burbujas y las grietas con discontinuidades en la distribución de las franjas del HID.

La zona de la burbuja se corresponde en la imagen de fase, con una zona ausente de franjas. Esto se debe a la pérdida de continuidad en el diagrama de fase reconstruido. Por otra parte, las grietas pueden verse como una serie de discontinuidades aisladas en el patrón de interferencia. La fisura indicada en la figura 5-37, solo pudo ser identificada mediante el diagrama de fase demodulada mostrada en la figura 5-39.

En la secuencia es posible observar claramente la zona de la burbuja y en el holograma de mayor delta de temperatura, se muestra circunscripta la grieta que se desarrolla bajo la superficie.

En la figura 5-39, se muestra el diagrama de fase correspondiente a una zona particular, en donde se encuentra la fisura detectada mediante el uso de la lupa estereoscópica. Con este diagrama no fue posible localizar la fisura, sin embargo, la discontinuidad en las franjas que se extendía desde el extremo derecho de la burbuja, podría haber indicado la presencia de la fractura.

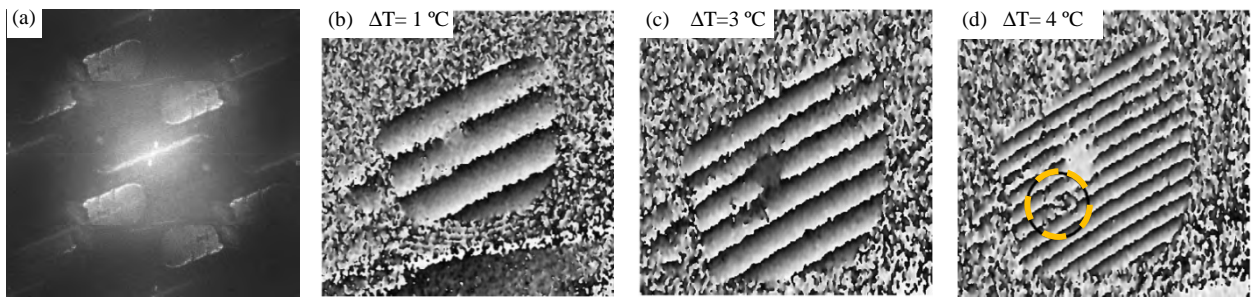


Figura 5- 38. Secuencia de tres HID con diferentes intervalos de temperatura los cuales indican el aumento de franjas en forma proporcional.

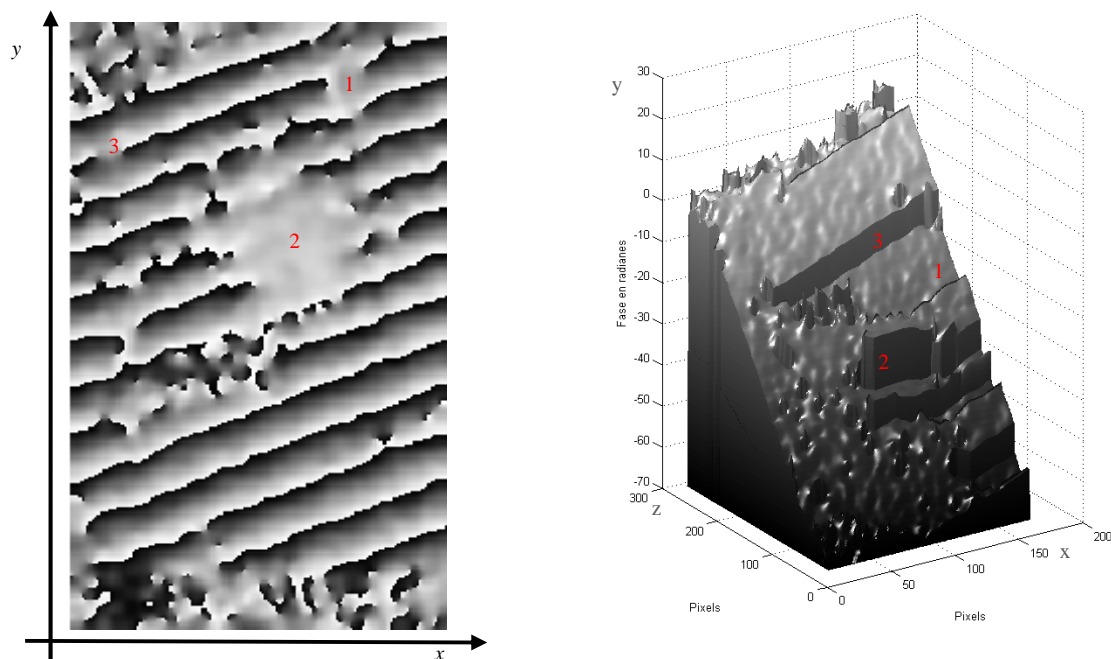


Figura 5- 39. (a) Diagrama de fase del HID. (b) Diagrama de fase demodulada. (1) Fisura. (2) Burbuja. (3) Grieta

Ensayo de la muestra 4.

La muestra 4 se corresponde con las imágenes (b) y (c) de la figura 5-35, en la cual se realizó un corte longitudinal en la zona de soldadura. De la observación directa de la superficie no es posible definir grietas o fisuras derivadas del proceso de soldadura.

Para el análisis interferométrico se realizaron un total de 20 hologramas en un rango de temperatura comprendido entre 48°C y 38°C. Como resultado se obtuvieron HID con una distribución de franjas homogéneas horizontales con centro de curvatura situado en el borde superior derecho. Este tipo de franjas indicarían una deformación fuera del plano. La forma de comprobar esto es a partir del diagrama de demodulación de fase. Sin embargo, dado que la imagen se ubica sobre el término de continua, no es posible aplicar el método de reconstrucción sin separar los cuadrantes. Esta operación implica sacrificar parte de la imagen para la construcción del diagrama de fase.

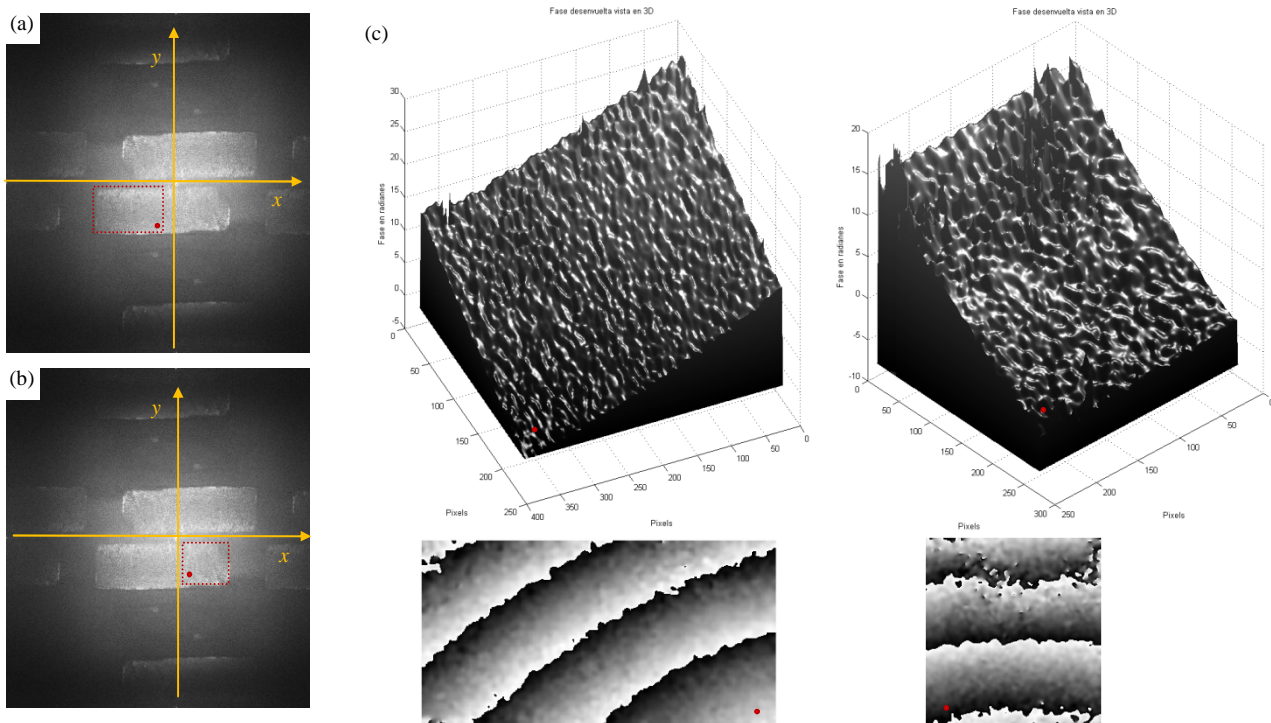


Figura 5- 40. (a) Imagen de amplitud de la muestra 4, tercer cuadrante imagen virtual. (b) Cuarto cuadrante imagen virtual. (c) Diagrama de fase y de fase demodulada del tercer y cuarto cuadrante, correspondiente a cada una de las áreas punteadas. El punto rojo indica el punto de fase de referencia.

Del diagrama de demodulación de fase, resulta difícil definir una deformación fuera del plano, mostrándose un alto grado de homogeneidad en la deformación del objeto.

Discusión de los resultados.

Un total de cuatro muestras fueron analizadas mediante HID, se realizaron más de 25 hologramas por muestra y se reconstruyeron imágenes en diferentes intervalos de temperatura. Además, se construyeron diagramas de fase demodulada por dos métodos diferentes. Como resultado se obtuvieron en tres de las cuatro muestras (1, 2 y 4) resultados que indicaban un comportamiento libre de tensiones residuales o defectos en el material. Sin embargo, en la muestra número 3, pudieron identificarse diferentes problemas asociados al proceso de soldadura. El análisis visual mediante la lupa estereoscópica, mostró la existencia de burbujas, grietas y una posible fisura derivados del proceso de soldadura. Los diagramas de fase por HID no mostraron resultados determinantes en la detección de la fisura, sí la presencia de burbujas o bien grietas bajo la superficie. Aplicado el diagrama de fase demodulada, la existencia de cada uno de los defectos se hizo evidente.

3.2. Análisis cuantitativo.

Medición de la deformación introducida mediante compresión mecánica.

Previamente, cuando se presentaron los métodos de inducción de la deformación se mostraron los resultados preliminares de introducir una compresión sobre un objeto elástico. En este apartado, se documentan la totalidad de los resultados obtenidos oportunamente en el ensayo de un taco de goma de tipo cilíndrico, usado como límite inferior del sistema de suspensión en diferentes modelos de General Motors. El mismo cumple la función de evitar el choque entre el brazo de suspensión y el chasis del vehículo. El material usado en su construcción es goma de alta densidad, desconociéndose parámetros constructivos relacionados con las fuerzas de tracción o compresión. Como consecuencia, se realizaron una serie de hologramas exploratorios buscando el límite inferior de la magnitud de la fuerza que desarrollase una deformación mensurable, límites que rápidamente fueron encontrados.

En la figura 5-41 puede verse el taco utilizado en el análisis interferométrico, montado sobre el chasis. Así como también, la impresión que deja sobre el brazo de suspensión cuando este llega al final de su recorrido.



Figura 5- 41. Fotografía del sistema de suspensión y detalle del taco de goma que limita el recorrido del brazo de suspensión. Objeto analizado posteriormente mediante interferometría holográfica.

Como puede verse el taco de forma cilíndrica posee una extensión de forma cónica en el centro del mismo. Si se observa en detalle puede verse una de las improntas usadas como zona de análisis.

Metodología.

Como esquema óptico se dispusieron los elementos con el mismo esquema utilizado en ensayos precedentes, el holograma en línea de haces sobrepuestos documentado en el Capítulo II. Sobre el taco de goma se dibujaron una serie de secciones rectangulares verticales y horizontales. Esto se realizó con una pintura elástica blanca, con la finalidad de mejorar la reflexión de la luz. Finalmente se decidió usar una sección rectangular vertical, apoyando el taco de goma sobre una base indeformable e introduciendo una fuerza vertical en un punto de apoyo de muy baja sección, tal como se muestra en la figura 5-42

Como punto de apoyo fue usada una barra de metal de 2 mm de diámetro, sobre la que se ejerció una fuerza variable directa, generada mediante la incorporación sucesiva de masas de 10 g por holograma. En el esquema óptico el ángulo de observación fue de $9,1^\circ$ y el ángulo de iluminación de 35° . La distancia cámara objeto de 35 cm y la distancia filtro objeto 14 cm.

Se realizaron un total de 10 hologramas incrementándose la masa en 10 g por cada holograma.

Los interferogramas fueron obtenidos mediante la combinación de los hologramas sucesivos tomando como referencia el holograma 1 (soportando la deformación inducida por el sistema de montaje sin el agregado de masas).

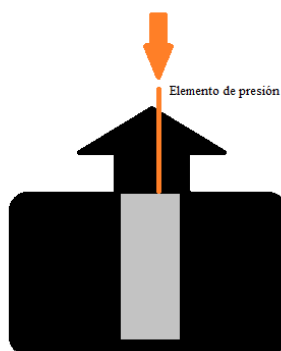


Figura 5- 42. Esquema de montaje del sistema de deformación utilizado sobre el taco de goma.

Resultados.

Los nueve HID resultantes pueden verse en la figura 5-43 en los cuales la deformación incrementa el número de franjas entre HID en medio orden por incremento de masa. Para distinguir esto debe observarse como se desplazan las franjas en forma descendente y cómo cambian de clara a oscura en para cada intervalo de masa.

En la tabla 5-1 se muestra el resultado del cálculo de las deformaciones obtenido mediante la ecuación que define los desplazamientos puros en y (ecuación 2-51).

La imagen resultante del HID entre el holograma 1 y el 2 muestra un desplazamiento extremadamente pequeño, existiendo solo una franja bien definida. Sin embargo puede observarse claramente el punto de presión sobre el taco de goma.

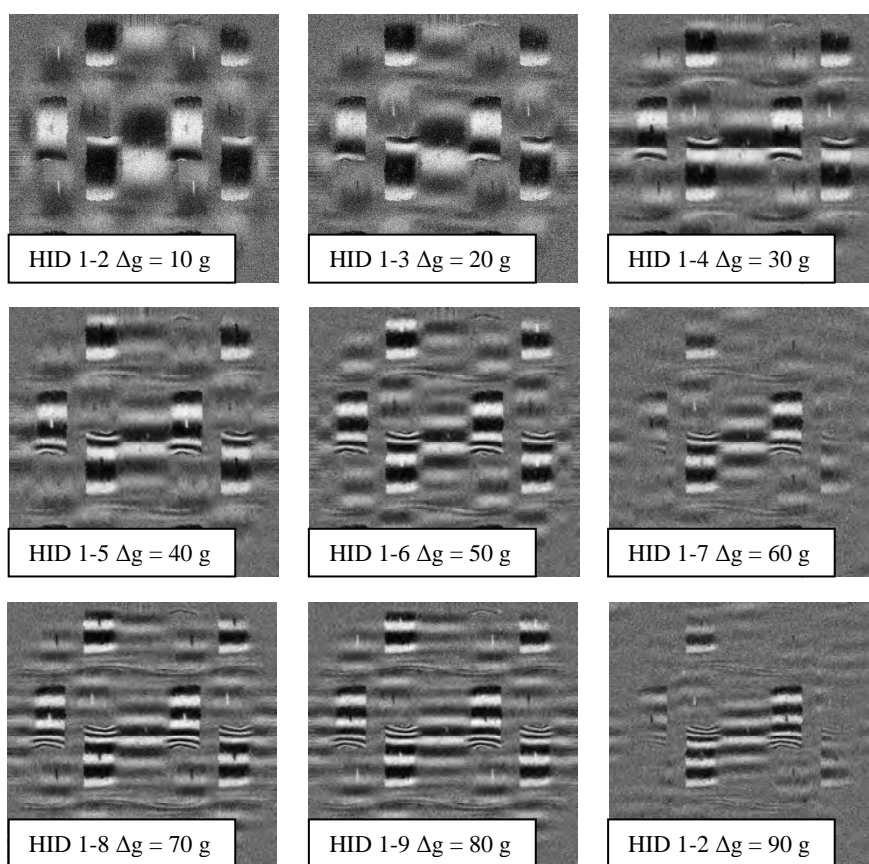


Figura 5- 43. HID resultantes de aplicar incrementos de 10 g sobre el punto de apoyo del inductor de la deformación.

Tabla 5-1. Resultados de la deformación en función del incremento de masa.

Número HID	Δm	n	Δy
HID 1-2	10 g	1	355 μm
HID 1-3	20 g	2	502,7 μm
HID 1-4	30 g	2,5	562,1 μm
HID 1-5	40 g	3	514,8 μm
HID 1-6	50 g	3,5	664,2 μm
HID 1-7	60 g	4	710 μm
HID 1-8	70 g	4,5	753,1 μm
HID 1-9	80 g	5	793,8 μm
HID 1-10	90 g	5,5	832,6 μm

La imagen resultante del HID entre el holograma 1-3 muestra una deformación levemente superior a la anterior, encontrándose un número total de dos franjas bien definidas.

Entre el holograma 1 y 4 pueden observarse el mismo número de franjas, habiéndose desplazado hacia abajo la segunda franja oscura y comenzándose a ver la tercera franja. En este caso podría considerarse dos franjas y media como desplazamiento total.

En HID 1-5, puede observarse como la deformación avanzó media franja más, existiendo tres franjas oscuras bien definidas así como en el HID 1-6.

En el HID 1-7 puede observarse una pérdida parcial de correlación entre los hologramas 1 y 7. Esta pérdida de correlación queda definida por la reducción en el nivel de contraste de las imágenes de orden superior. Por otra parte pueden observarse franjas sobre el término de continua, con un número similar a las franjas que se superponen a la imagen de fase.

Los resultados se repiten a iguales intervalos de masa hasta el último HID, mostrando un incremento de media franja para cada variación de presión ejercida sobre el taco de goma. A partir de la combinación de los hologramas 1 y 2 vemos que no es posible registrar deformaciones inferiores a los 355 μm , sin embargo el incremento mínimo correspondiente a media franja (cambio de franja clara a oscura sobre el punto de presión) permite definir un incremento de 38 μm . Así, queda claro que para reducir tanto la magnitud inicial como la incremental, deben cambiarse las distancias de observación e iluminación. Otro aspecto interesante es que el incremento de la deformación se reduce en la medida que el número de franjas aumenta. En el gráfico1 de la figura 5-44, se muestra la evolución de la deformación y la evolución del incremento de la deformación. En el primero de los gráficos vemos una evolución lineal de la deformación medida, no siendo directamente proporcional tal como lo establece la ley de Hooke. Esto se debe a indeterminaciones en la capacidad del método en el registro de deformaciones inferiores a la magnitud establecida para una franja.

Para el cálculo de la constante de elasticidad fue necesario realizar un ajuste de la curva, incorporando el peso del sistema previo a la mínima deformación registrada. Esto es, la fuerza que ejercía el sistema de montaje y que no fuera considerada en la experiencia dado que no permitía registro de deformación por este método.

Mediante interpolación de datos fue posible definir una masa equivalente actuando sobre el taco de goma, sin capacidad de producir deformación registrable, de 100 g valor que fuera constatado posteriormente.

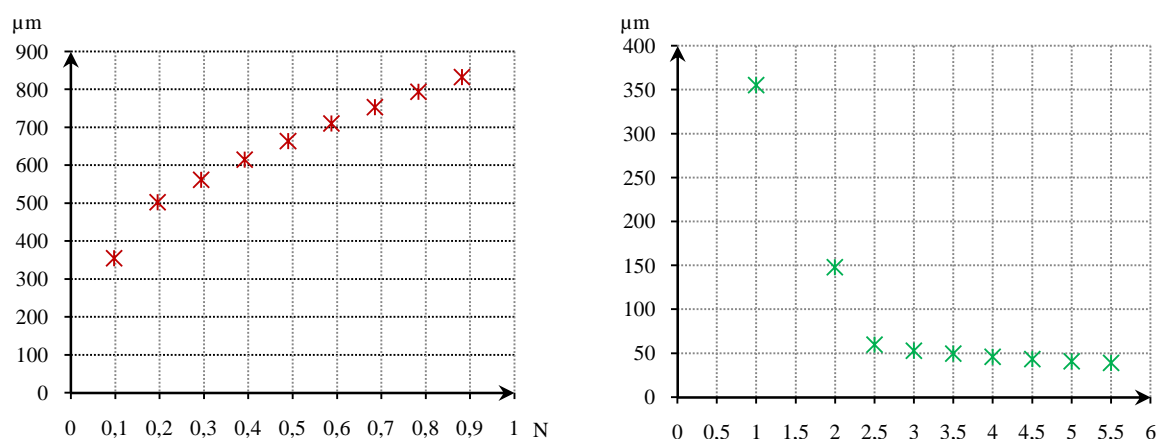


Figura 5- 44. Graficas de deformación en función de fuerza y gráfica de incremento de deformación en función del número de franjas

3.2.2. Medición de desplazamiento puro en z.

En el apartado precedente se documentó como mediante una deformación mecánica era posible evaluar las deformaciones sufridas por el objeto bajo estudio. La dirección de la deformación fue elegida en y dada la relación entre la magnitud de la deformación y la cantidad de franjas definidas por la ecuación 2-51. Evidentemente que los errores metodológicos que se producen al inducir la deformación mecánicamente se ven minimizados a partir del registro de deformaciones cercanas al milímetro.

Si se cambia el sentido de la deformación en x o en z , nos encontraremos con la capacidad de medir deformaciones del orden de las micras. Es aquí donde los errores generados por los movimientos indeseados del mecanismo de inducción de la deformación mecánica entran en juego.

Aquí, se presenta un caso particular de inducción de la deformación pura en z , la cual representa en condiciones acotadas, deformaciones registradas sobre una parte E de un núcleo de un balasto proveniente de una línea de producción de equipos auxiliares de iluminación estudiados y documentados en el Capítulo III.

En este punto se busca, mediante la inducción de deformaciones mecánicas generar deformaciones comparables a las observadas en la figura 3-15 (b).

Metodología.

Para este ensayo se definió una distancia de objeto a cámara de 30 cm y una distancia de objeto filtro de 14 cm, manteniéndose las condiciones del montaje óptico de la figura 5-3. Se introdujo una deformación pura en z mediante la utilización de un desplazador micrométrico con punto de apoyo en el vértice del ángulo interior del brazo izquierdo de la parte E, tal como se muestra en la figura 5-45.

El ángulo de observación se ubicó coincidente con la normal, siendo su magnitud 0° . El ángulo de iluminación de 38° .

La primera imagen fue tomada con el tornillo en la posición P_1 con desplazamiento fuera del plano positivo. La segunda imagen fue adquirida con el desplazador retraído una fracción no definida del tornillo micrométrico (por debajo de la mínima división).

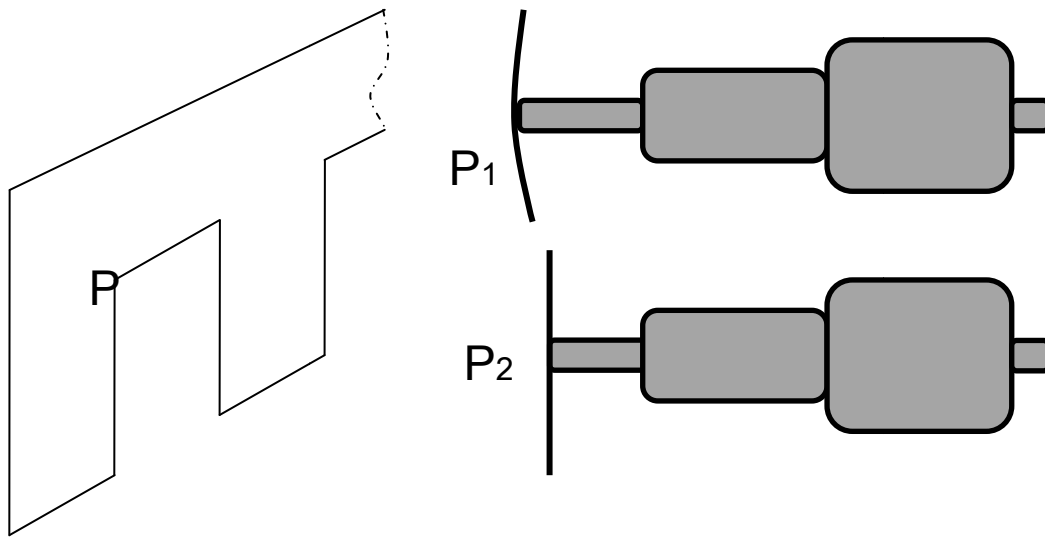


Figura 5- 45. Esquema en el que se muestra el punto de presión P y los estados inicial y final de la parte E del núcleo ensayado.

Resultado.

La combinación de los hologramas obtenidos en las condiciones definidas previamente puede verse en la figura 5-46, en la cual podemos observar un total de 5 franjas oscuras representativas de la deformación inducida. La utilización de un filtro seno coseno permitió mejorar la definición de las franjas. La aplicación de la ecuación 2-45, permite obtener el valor final de la deformación. Así resulta;

$$\Delta z = - \frac{5 * 632 \cdot 10^{-9}}{(\cos (38) + \cos (0))} = -1,77 \mu m$$

Donde signo negativo representa una dirección de observación opuesta en el diagrama de distribución de fases.

La magnitud calculada es similar a la definida en el holograma convencional que permitió identificar una deformación localizada fuera del plano.

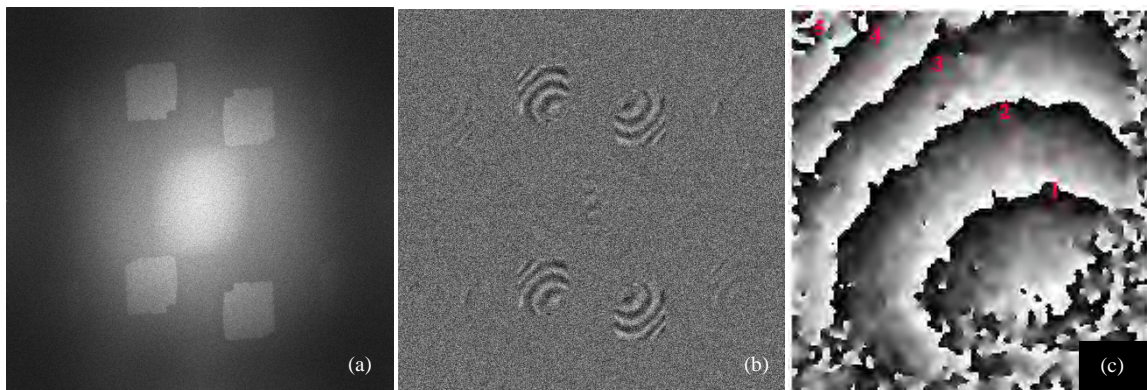


Figura 5- 46. (a) Holograma de amplitud de la zona de estudio. (b) Holograma de fase. (c) Holograma filtrado de fase con numeración de franjas.

Claramente la distribución de franjas es circular con centro en el vértice del ángulo, punto coincidente con el punto de generación de la deformación.

El diagrama de demodulación de fase obtenido por el método de guiado de calidad, reafirma lo mostrado en las imágenes de fase.

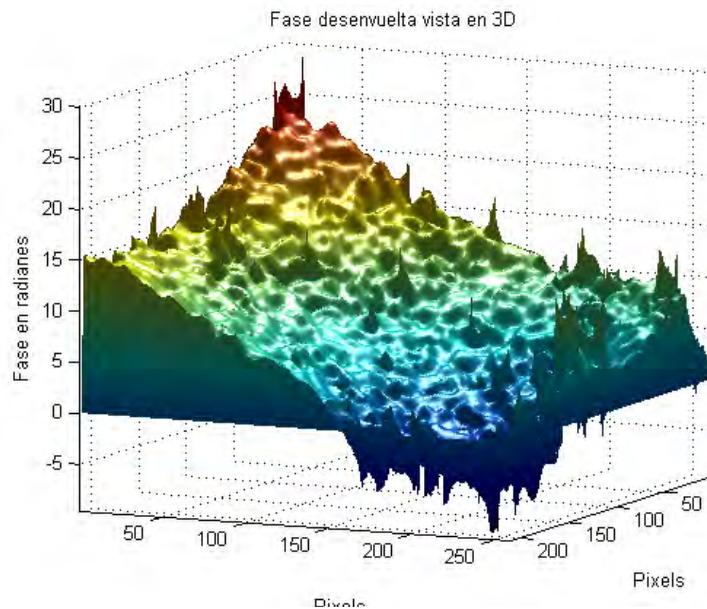


Figura 5- 47. Diagrama de fase demodulada.

Claramente el diagrama se encuentra invertido en su desarrollo tal como lo define el signo de la ecuación precedente, encontrándose el punto de fase 0° en el ángulo interior y el de máxima excursión, 25 radianes, en el extremo opuesto.

4. Conclusiones.

Habiendo probado los diferentes métodos de inducción de la deformación, para ensayos de interferometría holográfica digital, podemos observar que no existen ventajas comparativas entre estos. En el caso de deformaciones inducidas por dilatación, vemos que para definir perfectamente el comportamiento de la pieza bajo estudio, debe realizarse un esfuerzo extra para obtener el vector deformación. Como lo señalamos, deberemos introducir o un cambio en el ángulo de observación o bien obtener 4 hologramas diferentes mediante la variación del ángulo de iluminación.

Por otra parte las deformaciones mecánicas permiten conocer previamente el sentido y la dirección del vector deformación. Sin embargo, se presenta el problema adicional de conseguir un correcto dimensionamiento de la fuerza a ser aplicada. En particular, sobre objetos de gran dureza. En estos se presenta la complicación adicional del montaje del sistema óptico.

Las ondas de sonido, introducen una deformación mecánica de muy pequeña escala, lo cual también representa un inconveniente. Sin embargo es fácil predefinir, según el objeto bajo estudio, el sentido y dirección del vector deformación.

En función de esto es que se debe considerar para cada ensayo particular, el o los métodos más adecuados para la inducción de la deformación sobre el objeto. Debe además, ser considerada la particularidad del objeto bajo estudio. Tratándose de piezas de un alto valor económico o patrimonial, se deberá seleccionar siempre el método que menos efectos secundarios pueda generar.

Comparativamente el análisis de HID respecto del de HI, presenta como ventaja fundamental la velocidad de procesamiento del holograma. Mientras que en la HI un ensayo puede demorar horas en HID solo depende del tiempo de procesamiento del ordenador. Sin embargo, la HID sacrifica gran parte de la información derivada del análisis cualitativo, en particular en la detección de fisuras. En este caso la HI presenta un grado de definición inalcanzable para la HID en el estado actual de la tecnología de los CCD. Como contraparte la posibilidad de un análisis cuantitativo directo convierte a la HID en un método más concreto y de precisión.

Otro aspecto particular a tener en cuenta en aplicaciones de la HID es la definición de la zona de interés. A diferencia de la HI la pieza debe ser de dimensiones acotadas. Una alternativa es la realización del estudio por partes, en el cual una ventana de observación es desplazada en una cuadrícula sobre el objeto bajo estudio [Ferreira, 2012], o bien como se implementó en los análisis realizados, se aísla zona de interés pintando con un color absorbente las partes del objeto que no presentan particularidades.

Sin lugar a dudas la principal ventaja de la HID, es la posibilidad de definir rápidamente el rango de la deformación. Esto, permite aplicar la inducción de la deformación mecánica ya que con una serie de ensayos sucesivos, de corta duración, es posible encontrar las franjas que demuestran la deformación. En HI, este mismo trabajo podría llevar horas e incluso días. Por lo cual, las deformaciones mecánicas son poco aplicables.

En HI la utilización de métodos dinámicos resulta más simple que en HID como consecuencia de los largos tiempos de exposición de la película. Así, incluso bajas frecuencias de oscilación pueden ser utilizadas. En HID es necesario conocer en detalle la frecuencia de adquisición de imágenes de la cámara de CCD, dato que no todos los fabricantes ponen a disposición con total claridad.

Como método de ensayo no destructivo la HID demostró ser una herramienta de utilidad cuando se la usa como método cualitativo. Los resultados obtenidos del estudio de fisuras y grietas muestran claramente que cuando la fisura es de unas pocas micras de espesor, los resultados pueden ser ambiguos y condicionados fuertemente por el nivel de ruido speckle. Por otra parte, la existencia de una fisura siempre se verá identificada mediante un salto o discontinuidad del diagrama de fase demodulada, salto que puede tener su origen en limitaciones de procesamiento en el algoritmo. Sin embargo, los errores se manifiestan asociados a estos defectos. Este hecho, deja abierta una línea de investigación futura que relacione el tamaño de las grietas con el ancho en píxeles del diagrama. Para el caso de aplicación sobre muestras de una estructura colapsada, la HID mostró la capacidad de detectar problemas bajo la superficie del material. Resultado que permitiría su utilización como un método alternativo a la utilización de rayos x o ultrasonido.

Donde la HID muestra su verdadero potencia es en la aplicación a ensayos no destructivos de tipo cuantitativo. Aquí, definiendo correctamente el método de inducción de la deformación, dirección y sentido, rápidamente es posible obtener la magnitud del cambio de dimensiones. Seleccionando la dirección de la deformación, es posible obtener diferentes rangos de medición. Si se aplica en sentido vertical las aplicaciones se ubican por debajo del milímetro. Si se inducen deformaciones en sentido horizontal (x), el rango de medición se encontrará por encima de las micras y si se selecciona una deformación pura fuera del plano del objeto con ángulos de observación e iluminación iguales las magnitudes pueden llegar a ser submicrométricas.

Capítulo VI: Determinación del sentido de la deformación por medio el análisis dinámico del holograma interferométrico

En el Capítulo II, de la información obtenida de la bibliografía de referencia, se definió la imposibilidad de determinar el sentido de la deformación en aquellos hologramas en los cuales la deformación del objeto es de tipo volumétrica.

En los Capítulos III y IV, se presentaron diferentes ensayos no destructivos donde la aplicación de la dilatación térmica como método de inducción de la deformación dejaba en evidencia esta limitación.

Si observamos las figuras 5-46 y 3-21 vemos que presentan patrones de interferencia similares sobre el mismo objeto, pero conociéndose solamente en la figura 5-56 el sentido de la deformación por haber sido inducido mecánicamente.

En el Capítulo II se mostró un dispositivo robotizado construido para poder variar libremente el ángulo de observación del holograma. El objetivo de este desarrollo fue el de obtener de una manera simple y bien acotada el ángulo de observación de los HI. Así, se tuvo finalmente una forma de evitar la indeterminación que resulta en la posición de las franjas cuando un HI es observado en forma directa. Este inconveniente fue ampliamente documentado en la bibliografía, principalmente en los libros en los cuales se describían las primeras experiencias en holografía. En los inicios de los ensayos por HI, se usaba una cámara fotográfica como único elemento disponible para dar solución a este problema tal como se mostró en el Capítulo II.

Con la evolución de la tecnología, la aparición de los ordenadores y las cámaras de CCD se reemplazó a la cámara fotográfica por este nuevo tipo de cámara. La adquisición de la imagen en forma digital permitió evolucionar hasta lo que hoy conocemos como HID. Sin embargo, no se encuentran en la bibliografía antecedentes a la posibilidad de realizar un análisis dinámico del holograma, entendiendo como análisis dinámico la posibilidad de observación del holograma con un movimiento finito en el tiempo. Schnars, Lauterborn y Hariharan, entre otros autores, indican la posibilidad de obtener más de un holograma para poder definir la selectividad espacial, información perdida en el propio proceso de construcción del holograma.

De los resultados correspondientes a los ensayos no destructivos por HI, surgió la hipótesis que indicaba la posibilidad de recuperar la pérdida de selectividad espacial (sentido de la deformación) a partir de un proceso dinámico en la observación. De demostrarse esta hipótesis ya no sería necesaria la obtención de más de un HI para definir el comportamiento de un objeto cuando el objeto se deforma tridimensionalmente.

En este capítulo se demuestra como mediante la combinación de la reconstrucción del HI por simulación, con la reconstrucción dinámica de la imagen resultante de un HI y la reconstrucción de un HID, es posible plantear una tesis que demuestra la recuperación de la selectividad espacial mediante la obtención de un solo ensayo holográfico.

La tesis particular comienza con el planteo de las experiencias que inicialmente dieron origen a la hipótesis de estudio. Mediante resultados derivados de diferentes ensayos son mostradas las condiciones en las cuales es sacrificada la selectividad espacial.

La redefinición del término **información perdida** es propuesta a partir de considerar que ya no se trata de la pérdida, si no del desconocimiento de la misma en los diferentes ensayos HI o HID.

Mediante simulaciones computacionales y sus sucesivas modificaciones, relacionadas con patrones observados en los HI o HID se reproducen las condiciones dinámicas. Como resultado de estas, se

demuestra que la selectividad espacial puede ser rápidamente definida transformando la observación del holograma en un proceso dinámico.

Finalmente y a partir de los resultados precedentes se demuestra que la combinación de la HI y la HID, permitirían la recuperación de la información desconocida así como también maximizar la información obtenible de un ensayo interferométrico holográfico.

1. La información perdida.

La selectividad espacial hace referencia al sentido de avance de la deformación. En la figura 6-1 podemos identificar tres casos en los cuales la selectividad espacial ha sido sacrificada. Claramente vemos que las deformaciones registradas son en la dirección fuera del plano.

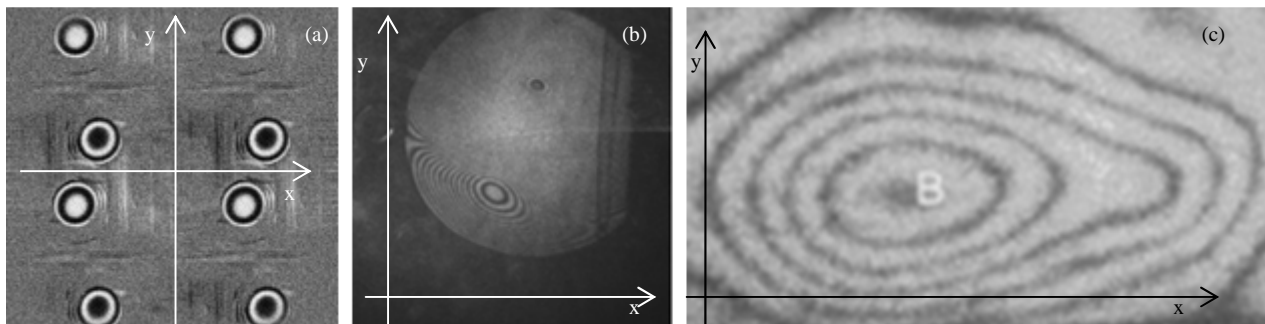


Figura 6- 1. (a) HID resultante de aplicar una variación térmica a una membrana bimetalítica. (b) Inducción de una deformación pura en z en un HI con dos zonas concéntricas, resultante de la aplicación de una deformación mecánica. c) HI aplicado a una probeta de acero AISI 304 sometida a un ΔT de 1,5 °C. Los ejes se encuentran ubicados en el plano del objeto.

En las tres imágenes es posible distinguir distribuciones similares, es decir franjas que se cierran sobre sí mismas con un punto central. Si bien estas zonas, pueden ser definidas como de deformación fuera del plano del objeto, no podemos asegurar del simple estudio del holograma si la deformación tuvo una dirección entrante o saliente del plano $[x,y]$ (perdida de selectividad espacial).

Esta incertidumbre puede ser perfectamente definida a partir de dos reconstrucciones hechas precedentemente: figura 6-2. La primera representa una reconstrucción del diagrama de fase obtenido mediante simulaciones y relevamiento de un HI de una probeta de acero similar a la mostrada en la figura 3-10. La segunda un diagrama de demodulación de fase obtenido de un HID correspondiente al desplazamiento de una barra bimetalítica.

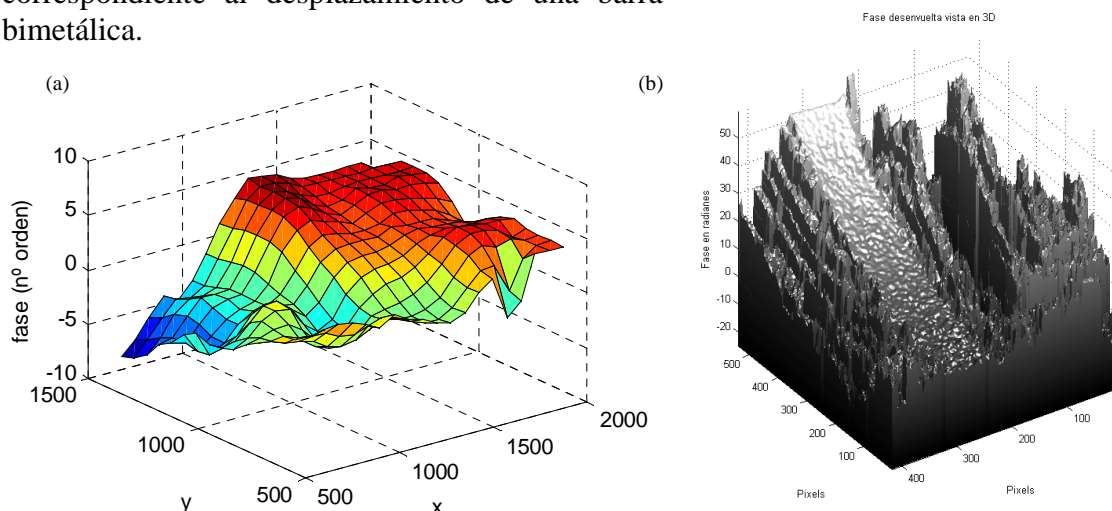


Figura 6- 2. (a) Reconstrucción mediante el uso de una plancheta digitalizadora del patrón de franjas resultantes de un HI. (b) Diagrama de fase demodulada correspondiente a una barra de material bimetalítico. En ambos casos las deformaciones fueron asignadas arbitrariamente.

Ambos diagramas tiene la particularidad de haber sido obtenidos a partir de un punto de referencia de fase relativo. De estos, no es posible definir si las deformaciones registradas son realmente como se las muestra.

En este punto, podemos decir que la información perdida en la interferometría holográfica presenta dos aspectos fundamentales:

- El desconocimiento del punto de fase 0° .
- El desconocimiento del sentido del vector deformación.

2. La información desconocida en la HI.

En la figura 6-3 se muestra una secuencia de imágenes correspondiente a una serie de fotogramas obtenidos a partir de cambiar el ángulo de observación del holograma. En esta secuencia se puede observar cómo se pasa de un mínimo a un máximo en la medida que cambiamos el ángulo. Es evidente que el cambio en el ángulo de observación debe introducir un cambio en el ordenamiento de las franjas. Si se trata de una deformación pura fuera del plano evidentemente las franjas irán cambiando de manera que:

El orden de la franja central cambie.

El número de franjas aumente o disminuya.

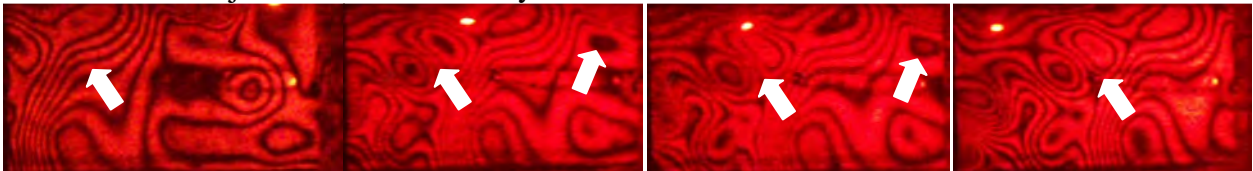


Figura 6- 3. Secuencia de fotogramas que muestran el cambio de ordenamiento de franjas cuando el holograma es observado mediante una rotación del ángulo de observación.

Evidentemente, esta suerte de sentido en el cambio de los patrones debe relacionarse de alguna manera con la selectividad espacial. En más de 50 años de investigación y documentación sobre HI, no se ha hecho mención en forma notable sobre este fenómeno. Los análisis más profundos relacionados con la interpretación de las franjas en HI plantean la necesidad de:

- Utilizar un cambio en el índice de refracción del medio.
- Utilizar más de una longitud de onda.
- Introducir un desplazamiento de fase mediante un cambio en el ángulo de la película.

La secuencia de la figura 6-3 es la que da origen a la hipótesis de trabajo, la observación dinámica del holograma en zonas de deformación localizada debe permitir reconocer la información desconocida.

3. El modelo dinámico en la observación del holograma.

El paso de un modelo estático a un modelo dinámico es una operatoria bien conocida en física. En general, aporta información que en uno u otro modelo no es posible identificar.

Para comenzar es necesario retomar ecuación 2-52, pero ahora pongámosla en función del tiempo.

Si se cambia el ángulo de observación en forma dinámica, de manera que su posición dependa del tiempo, evidentemente la ecuación a priori resulta inconsistente dado que el primer término es constante (deformación introducida durante la construcción del holograma interferométrico). Esto quiere decir que junto con el cambio en el ángulo de observación algo más debe cambiar de manera que el primer término resulte constante.

Por simplicidad retomemos la expresión de la ecuación 2-53 cuando la deformación es unidireccional y fuera del plano (ecuación 2-45):

Que poniéndola en función del tiempo resulta:

$$\Delta\phi(t) = -\Delta z \frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_i + \cos\theta_o(t)] \quad \text{Ec. 6-1}$$

Dado que idealmente el ángulo de observación varía desde $-\pi/2$ a $\pi/2$, el coseno variará de 0 a 1. Además si hacemos que el ángulo de incidencia sea de 0° , entonces el término:

$$2\pi \leq 2\pi(\cos\theta_i + \cos\theta_o(t)) \leq 4\pi$$

Es evidente que, el ángulo de fase $\Delta\phi(t)$, se verá forzado a un cambio total de 2π . En este caso muy particular, si el cambio del ángulo de observación produce este cambio de fase, entonces al rotar la cámara deberíamos ver como una franja central inicialmente clara se torna oscura y posteriormente clara nuevamente sin haber notado un cambio del número total de franjas.

Si el número total de franjas no cambia, entonces la deformación permanece constante, indicando que el módulo del vector deformación no se vio afectado. La dirección depende de la deformación inducida por lo cual tampoco puede cambiar. Es por lo tanto consecuencia directa, que el cambio dinámico en la distribución de intensidades del patrón de franjas obedece exclusivamente al sentido de rotación que se le dé al punto de observación.

Este planteo avala hipótesis particular planteada anteriormente.

4. Demostración de la relación entre la rotación del ángulo de observación y la información perdida.

Desde el comienzo de la aplicación de la HI en los años 70, se dio por hecho que cuando no se pudiera introducir una deformación conocida tanto en sentido como en dirección, el sentido debería ser sacrificado durante su análisis.

Así, quedó bien definido el concepto de información perdida. Nos cabe ahora la posibilidad de demostrar que esta información perdida tal vez no haya sido tal, simplemente a lo largo del tiempo esta fue “soslayada”.

La tarea es ahora demostrar que la selectividad espacial sacrificada solo permaneció oculta. Si esta fuera la situación, entonces evidentemente que la relación entre la información perdida y la desconocida fue y es directa.

4.1.El interferómetro de Michelson como modelo dinámico.

Como primera prueba a esta hipótesis se toma como modelo de validación elemental al interferómetro de Michelson – Morley. Usado inicialmente para el intento de demostración de la existencia del éter, es del tipo de variación longitudinal del camino óptico. En su configuración existe una trayectoria de referencia y una variable en longitud. Si al esquema se le agrega una lente a la salida del láser, usado como fuente de luz coherente, nos encontramos con un interferómetro de frente esférico. Por lo tanto, el patrón resultante será una sucesión de círculos concéntricos, anillos que se presentarán en un número proporcional a la diferencia de caminos ópticos correspondiente a cada trayectoria.

Si ahora pasamos de un modelo estático a un modelo dinámico de comportamiento del interferómetro, podemos observar que en la medida que una de las trayectorias cambia en el tiempo, el resultado es un cambio notable en el patrón observado.

Lo primero que se aprecia es que el número de franjas crece o decrece con el aumento o disminución de los caminos ópticos relativos. Así cuando ambos caminos son exactamente iguales solo se verá una zona uniformemente iluminada. En la medida que se alejan se sumarán anillos concéntricos al punto central. Si el aumento o disminución de la distancia se genera lentamente,

entonces se podrá notar que no solo aumenta el número de franjas, si no que el punto central del patrón cambia su intensidad de un máximo a un mínimo y viceversa.

La explicación de éste fenómeno se basa en el hecho que para sumar una nueva franja el cambio de fase total debe haber sido de 2π . Si el proceso es variable en el tiempo, en la medida que la diferencia de fase se incrementa la intensidad relativa de cada franja debe cambiar proporcionalmente. El efecto visual resultante será similar al observado en los hologramas, cuando se rota el ángulo de observación. Esto es, el sentido de cambio de afuera hacia adentro se produce cuando los espejos disminuyen su distancia relativa, mientras que si aumenta las franjas muestran un sentido de apertura. Para demostrar esto podemos recurrir a filmaciones de patrones resultantes de un interferómetro de Michelson – Morley.

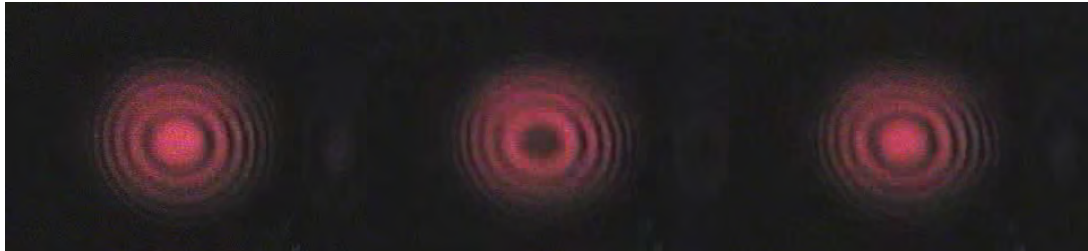


Figura 6- 4. Fotogramas sucesivos correspondientes al aumento de la distancia relativa entre espejos en un interferómetro de Michelson.

O bien mediante simulaciones que permiten obtener el patrón de interferencia.

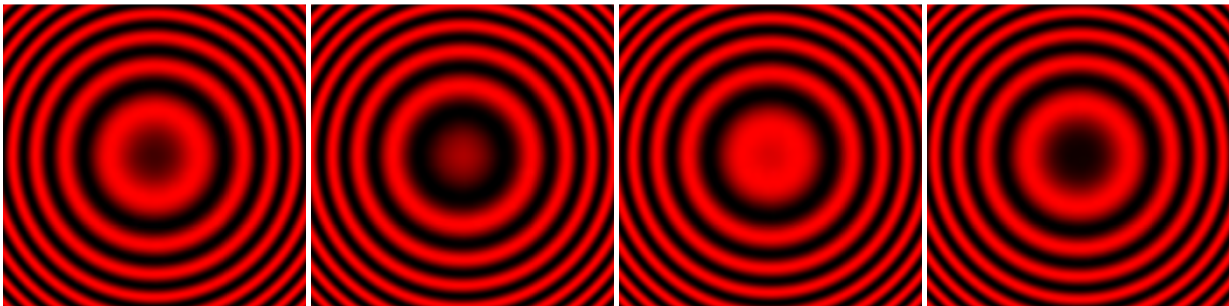


Figura 6- 5. Cuadros sucesivos de simulación correspondientes al aumento de la distancia relativa entre espejos en un modelo de interferómetro de Michelson.

Si bien el cambio en las franjas queda perfectamente demostrado, el fenómeno de apertura y cierre de las franjas solo es posible cuando existe una componente temporal en la reproducción. Si las franjas quedan definidas por la ecuación:

$$N = \frac{2n|d_2 - d_1|}{\lambda} \quad \text{Ec. 6-2}$$

Al agregarle una dependencia del tiempo resulta:

$$N(t) = \frac{2n|d_2(t) - d_1|}{\lambda} \quad \text{Ec. 6-3}$$

Así una variación en el tiempo de una de las trayectorias generará una variación temporal en el número de franjas. Si la variación temporal tiene asociada una variación longitudinal que tiende a alejar los caminos ópticos entonces, las franjas tienden a abrirse aumentando su número y si se acercan tienden a cerrarse disminuyendo en cantidad.

Si esta situación puede ser bien definida en un interferómetro, por analogía debería existir un fenómeno similar en la HI al tratarse del igual principio físico.

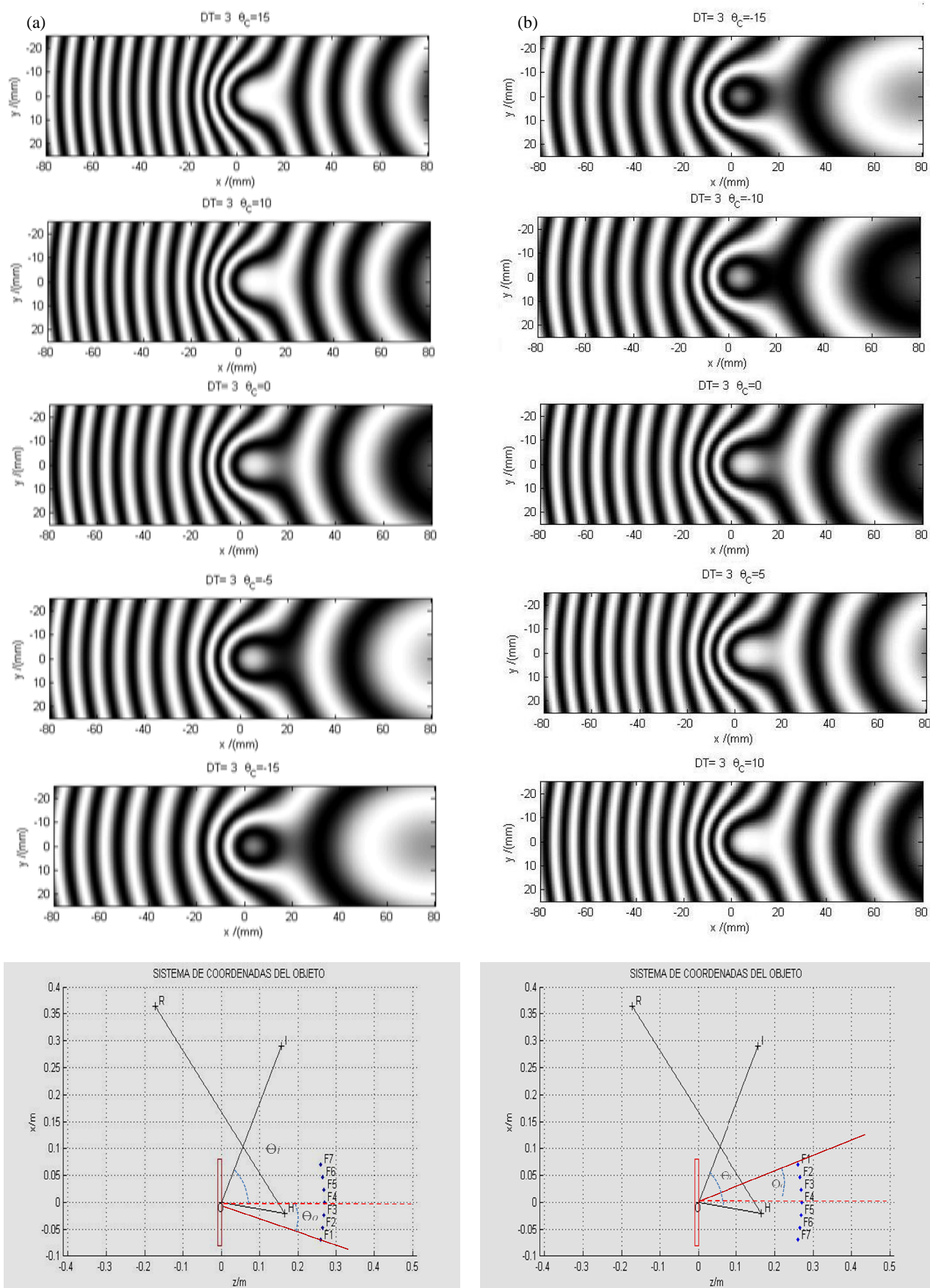


Figura 6- 6. (a) Diagrama de trayectorias asociado a la posición del observador y variación en la distribución de franjas obtenidas mediante simulación de una rotación antihoraria. (b) Diagrama de trayectorias asociado a la posición del observador y variación en la distribución de franjas obtenidas mediante simulación de una rotación horaria.

4.2.Simulación dinámica con rotación del observador en un HI con deformación pura en z.

En el punto Capítulo II, realizamos un análisis geométrico de las deformaciones introducidas en un objeto cuando la deformación se producía en la dirección de z o fuera del plano. En la figura 2-19 se mostró esquemáticamente las trayectorias y los ángulos que daban origen al holograma. Además se demostró como una variación en las dimensiones del objeto introducía un cambio de las trayectorias de incidencia y de observación. Por otra parte, una simulación por ordenador demostró que el resultado de una deformación fuera del plano daría como resultado franjas concéntricas, mientras que una inclinación o bien una curvatura del plano, darían franjas paralelas verticales u horizontales. En ninguno de los tres casos se aprecian diferencias en lo referente al sentido de la deformación, derivando en la pérdida de la selectividad espacial.

Si aplicamos los mismos métodos de simulación desarrollados oportunamente, pero le agregamos una serie de ciclos recursivos que permitan en cada ciclo una reconstrucción en función de la posición, los resultados cambian notablemente.

En la figura 6-6 (a) se muestra un diagrama de trayectorias en el cual podemos ver siete diferentes posiciones del observador. En este caso, el observador podría ser una cámara de CCD conectada a un ordenador y movilizada mediante un brazo robotizado como el documentado en el Capítulo II. Además se muestra una sucesión de instantáneas que indican para cada posición la distribución de franjas. Estos gráficos, obtenidos por simulación, muestran un patrón general asociado a una deformación pura fuera del plano combinado con una deformación localizada. Nuevamente no podemos definir a priori el sentido de la deformación.

El resultado de la simulación es evidente, la rotación del ángulo de observación genera un cambio tanto en la distribución como de la cantidad de franjas existentes en el patrón. Puede observarse como la franja circular asociada a una deformación localizada, para un ángulo de -15° va cambiando en la medida que la posición del observador avanza en sentido antihorario. Con la rotación puede verse claramente que la franja cerrada se convertirá en una franja abierta. Si la rotación se realiza en sentido horario el resultado será exactamente inverso al mostrado en la figura 6-6 (a) y tal como se muestra en la figura 6-6 (b).

Sin embargo de la simulación aplicada, resuelta mediante aproximaciones matemáticas, no es posible discriminar un sentido de la deformación, ya sea positivo o negativo en z . Solamente podemos visualizar una relación directa entre el sentido del ángulo de rotación y el cambio en la estructura de las franjas.

Con el fin de poder relacionar una simulación con lo que ocurre en un HI como el de la figura 6-3, deberíamos conocer de antemano el sentido de la deformación antes de realizar nuevas simulaciones. Además sería conveniente introducir un modelo que copie el comportamiento dinámico del holograma que dio origen a la secuencia de la figura 6-3, combinando de esta manera ambos métodos de reconstrucción.

Para lograr este objetivo, el algoritmo debe ser modificado de manera de generar un modelo equivalente al patrón observado en el HI de la probeta metálica. Para esto pueden ser introducidos dos puntos de deformación localizados, los cuales deberán presentar una excursión positiva y una negativa respecto del plano del objeto.

Un diagrama de superficie puede ser introducido dentro del algoritmo de reconstrucción del patrón de franjas de un HI, como el mostrado en la figura 6-8, el que se usará como primer modelo de aplicación.

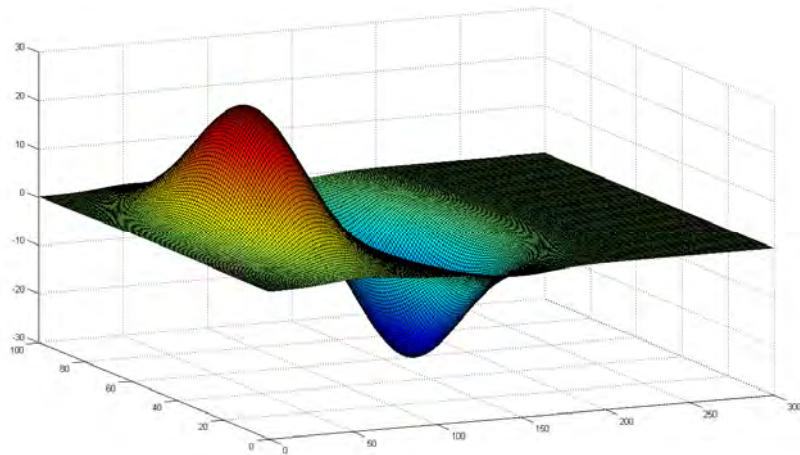


Figura 6- 7. Diagrama de superficie en el cual se muestra la inducción de una deformación bidimensional sobre un modelo computarizado usado para definir el sentido de la deformación.

Resultado de la simulación con deformación unidimensional bidireccional.

Como prueba de la hipótesis fueron realizadas una secuencia de ensayos en los cuales se incluyeron diferentes parámetros para la reconstrucción de los patrones de interferencia mediante simulaciones. En estos, se variaron tanto las magnitudes de la deformación como los ángulos de observación, aplicándose ángulos tanto positivos como negativos respecto del ángulo de referencia. Las reconstrucciones obtenidas fueron montadas como fotogramas y reproducidas como un video, con el fin de comparar los resultados y el comportamiento dinámico de la observación del HI en la figura 6-3.

De la aplicación del modelo explicado precedentemente, sobre una superficie de deformación bidireccional respecto del eje z y con el objeto en un plano $[x,y]$, da como resultado una distribución de franjas coincidentes con las modeladas anteriormente. Así, las franjas representan la magnitud del vector deformación, pero no aportan información respecto del sentido de la deformación.

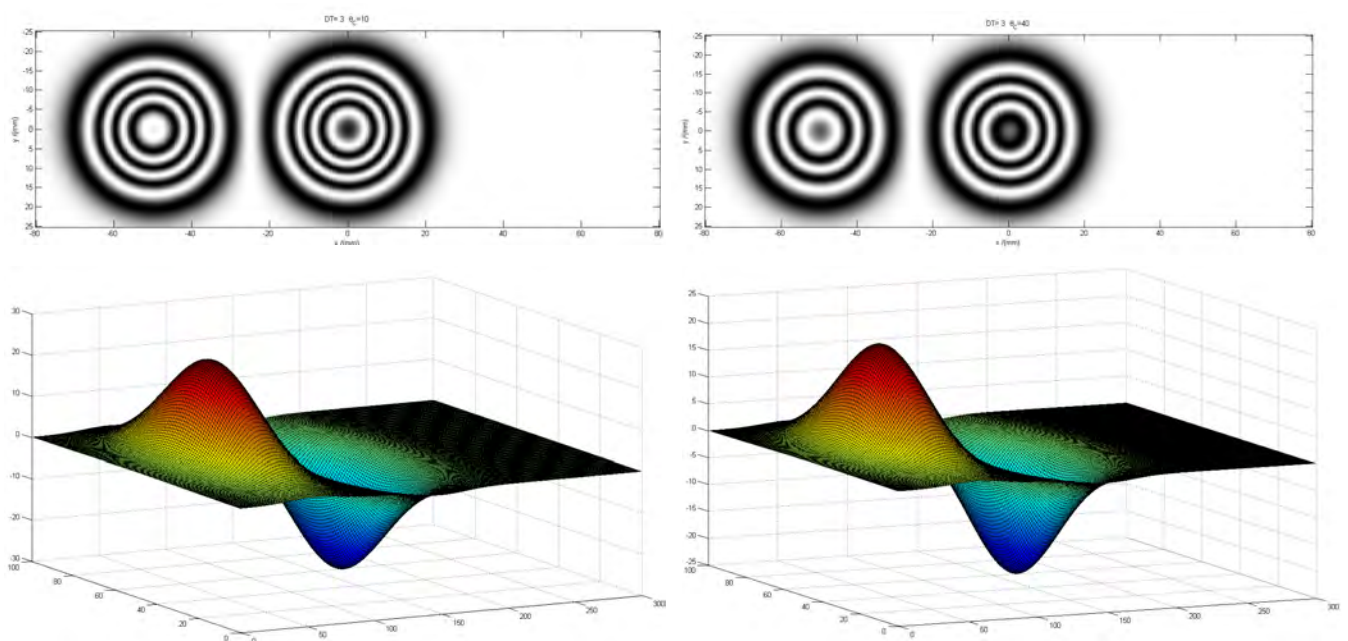


Figura 6- 8. Diagramas fase y de superficie en los cuales se muestran la inducción de una deformación bidimensional sobre un modelo computarizado y el diagrama de franjas correspondientes para un ángulo de 10° y de 40° .

En la figura 6-8 vemos la representación del diagrama de superficie, pero como función de la diferencia de fase y para un ángulo de observación de 10° y 40° respectivamente. Claramente el diagrama de franjas es similar entre una deformación y otra, diferenciándose únicamente en el orden de la franja central.

4.3. Simulación dinámica con rotación del observador en un HI con deformación bidimensional y bidireccional en z .

Hasta aquí hemos intentado demostrar que una rotación del ángulo de observación debería generar un cambio en la distribución de las franjas, de igual manera que lo observado en un interferómetro de Michelson. Sin embargo no hemos obtenido más que una variación en el número de franjas, esto en función del tamaño de la deformación y del ángulo de observación. En todos los casos, al realizar una rotación antihoraria encontramos una reducción del número de franjas. Sin embargo los resultados observados en diferentes hologramas interferométricos muestran una situación diferente. Del análisis de las ecuaciones de reconstrucción del patrón de franjas, queda claro que no existe posibilidad de reproducir este fenómeno. Esto, directamente relacionado con la reproducción de la fase ya que depende de funciones trigonométricas, las cuales ubican la distribución de franjas sobre un mismo plano de intensidades.

Si se observa en detalle la figura 6-3, claramente es apreciable la coexistencia de más de un sentido de deformación, combinándose deformaciones localizadas con deformaciones múltiples en (x,y,z) . De la ecuación 2-53, queda en evidencia que debe generarse un patrón complejo, si se intenta la reproducción de estas mediante el algoritmo de simulación.

Si se definen condiciones particulares para una simulación como:

- Una deformación uniforme y longitudinal en x , debida a una contracción.
- Una deformación longitudinal en z , debida a contracción.
- Una deformación saliente del plano del objeto.
- Una deformación entrante al plano del objeto.
- Una deformación lineal en y debida a contracción.

El resultado puede verse en la figura 6-9.

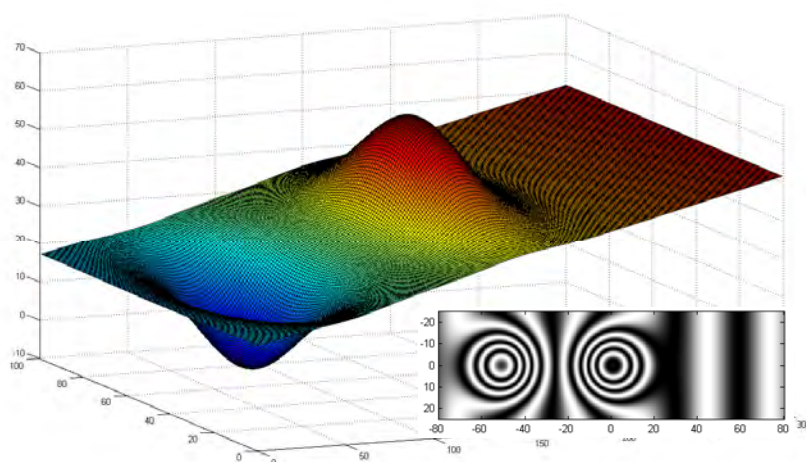


Figura 6- 9. Diagrama de superficie que representa la variación de fase total observada sobre el objeto para un ángulo de observación particular.

En este caso el punto de fase 0° se encuentra en el lóbulo inferior de la deformación localizada. Patrón de franjas simulado donde se superponen la deformación en (x,y,z) más las deformaciones localizadas en z .

Evidentemente las deformaciones puras en z quedan representadas por curvas concéntricas, con pequeñas diferencia en el número de franjas o la distribución de intensidades. La deformación longitudinal en x , queda representada por franjas verticales y paralelas, las que se verán moduladas en su distribución por las deformaciones localizadas. De la ecuación 2-52, es fácil determinar que las magnitudes en la diferencia de fases asociadas a deformaciones puras en z , son de órdenes superiores a las de deformación en x , razón por la cual se produce esta modulación en los patrones resultantes.

Las franjas que representan deformaciones en y no son visibles, dado que se encuentran un orden de magnitud por encima.

El diagrama de superficie muestra ahora las deformaciones localizadas y una inclinación que representa el cambio de fase debida a la dilatación en x , referenciada al punto de fase 0 tomado en el lóbulo inferior de la deformación localizada.

Bajo estas condiciones, podemos proceder con una simulación en la cual se introduzca una variación del ángulo de observación. El resultado es una serie de fotogramas que muestran la variación del patrón de franjas de interferencia.

Resultado de la aplicación del algoritmo.

El modelo de simulación fue aplicado bajo las condiciones antes mencionadas. Con este se realizaron diferentes ensayos hasta obtener las condiciones adecuadas para reproducir resultados similares observados en los HI de la figura 6-3.

En la rutina del algoritmo se aplicaron ciclos recursivos sobre una variación de 0.5° por paso, con el fin de observar en la reproducción dinámica la evolución en el comportamiento de las franjas, mostradas en la figura 6-11.

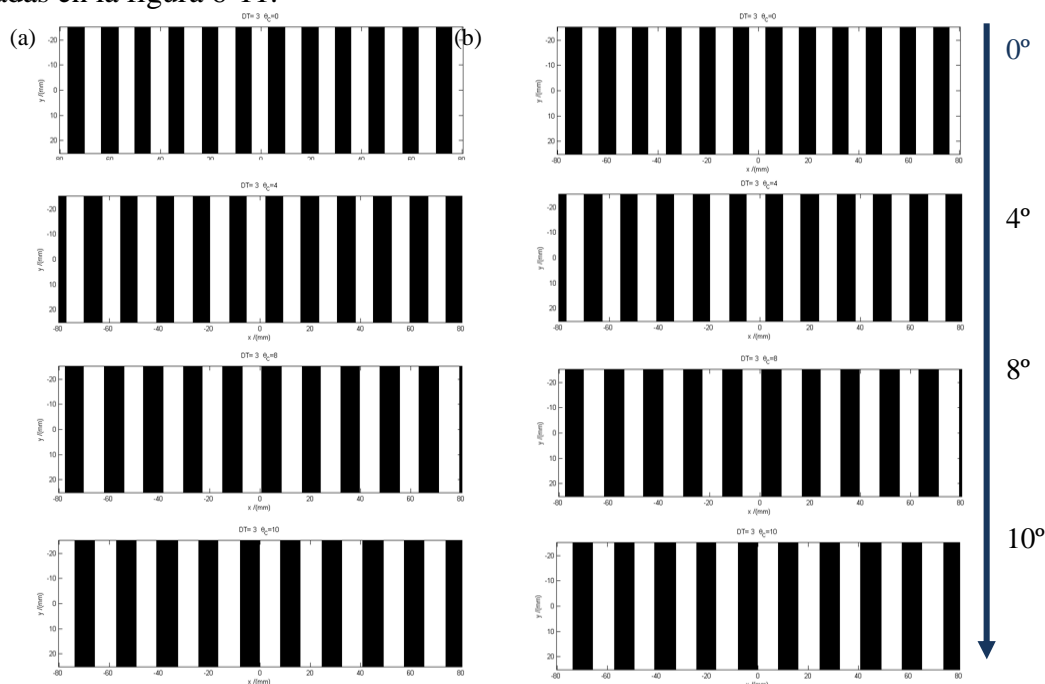


Figura 6- 10. Secuencia de diagramas obtenidos de la simulación para una deformación pura en x , introduciendo una rotación del ángulo de observación en sentido antihorario desde 0 a 10° . (a) Correspondiente a una compresión. (b) Correspondiente a una extensión.

En la secuencia de diagramas puede verse claramente que dado el cambio en el ángulo de observación, se produce un cambio en la diferencia de fase debido a la relación entre esta y la deformación. Para las franjas que representan la deformación en x , el desplazamiento es siempre hacia la derecha “apareciendo” desde la izquierda y “desapareciendo” sobre el lateral derecho, tal como se muestra en la figura 6-10 cuando la deformación es pura en x .

Para mantener las superficies de fase constante, en la medida que las franjas verticales se desplazan las correspondientes a las deformaciones localizadas se abren o se cierran en las zonas de deformación localizada. En este caso, las franjas que corresponden a una deformación en sentido negativo (concavidad) tienden a mostrar una apertura mientras que las convexidades un cierre, cuando se avanza en sentido antihorario, para un ángulo de observación mayor a 0° .

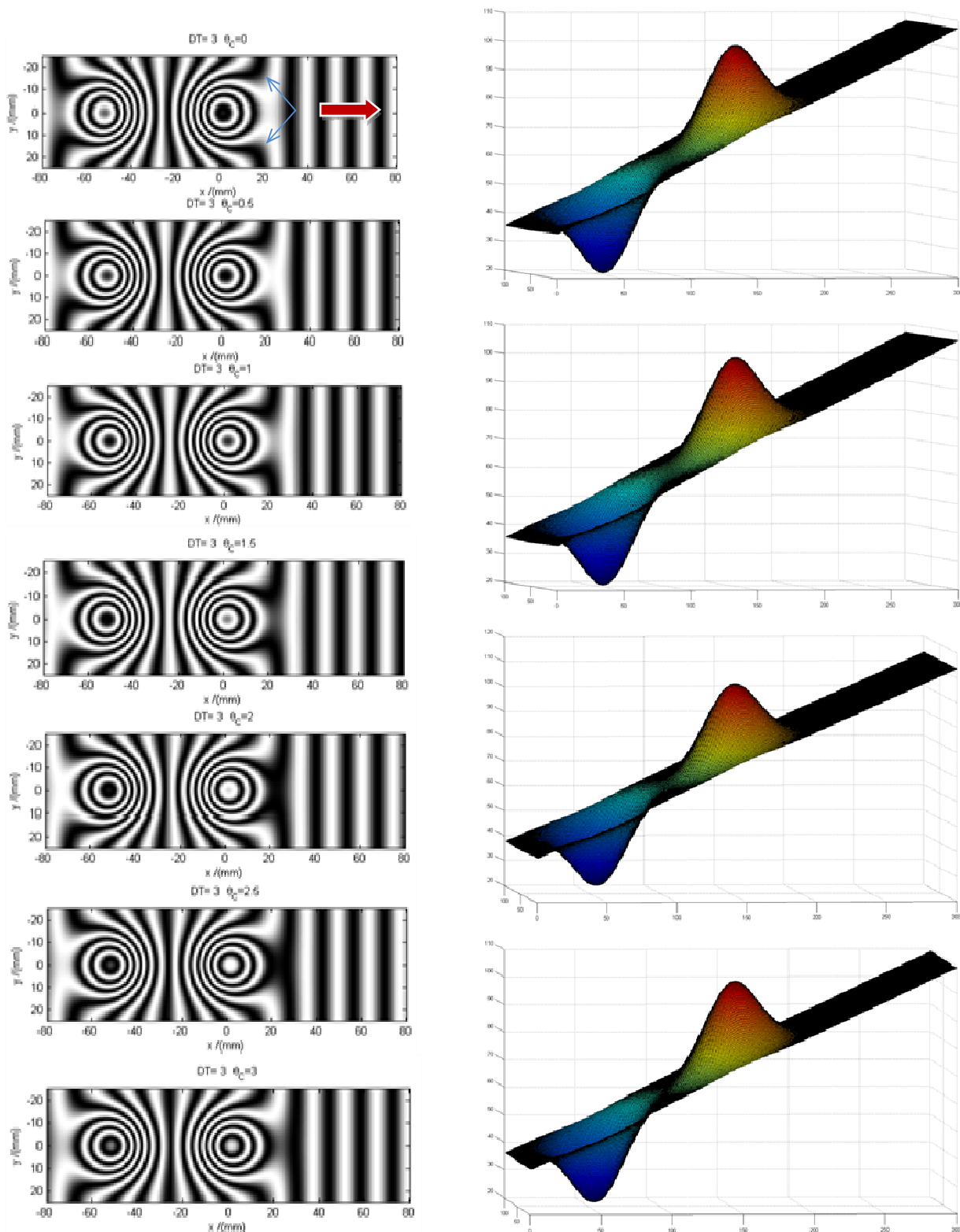


Figura 6- 11. Secuencia de diagramas de franjas obtenidos de la simulación para una rotación del ángulo de observación en sentido antihorario desde 0 a 3° correspondiente a una contracción, simulando la contracción en el proceso de enfriamiento de la probeta (figura 6-3).

Si se introducen dos deformaciones localizadas del mismo sentido, los patrones se combinan presentando un comportamiento dinámico que muestra una apertura o un cierre dependiendo del sentido de giro, el tipo de deformación (expansión o compresión) y del ángulo relativo de observación (mayor a o menor a 0° tomando como referencia la normal al plano del objeto).

Enunciado de las reglas que definen el comportamiento dinámico de las franjas en un HI.

Es evidente que al haberse implementado correctamente las simulaciones numéricas por ordenador, fue posible reproducir el comportamiento observado en hologramas interferométricos obtenidos mediante HI. Sin embargo, no es posible definir el sentido de la deformación si ésta es unidimensional y del tipo fuera del plano. Solo la coexistencia de deformaciones combinadas permite observar un comportamiento dinámico de las franjas que aporten información sobre la selectividad espacial del holograma.

La rotación del ángulo de observación puede ser usada para definir y explicar el comportamiento de la probeta metálica o bien de la barra de material bimetálico como el de la figura 6-2, pero poco puede hacerse para el caso del material bimetálico circular de la figura 6-1 (a).

Así, si se desea rescatar la información perdida en un HI se deberá:

- Encontrar deformaciones localizadas fuera del plano mediante la observación del HI.
- Asegurarse la existencia de superposición de deformaciones en x y z durante la construcción del holograma.
- Definir previamente el tipo de proceso de deformación, contracción o expansión.
- Ubicar una cámara CCD sobre un soporte giratorio, con centro de curvatura sobre la posición del objeto.
- Definir el punto de partida de la rotación, mayor o menor a 0° respecto de la normal al plano del objeto.
- Rotar en sentido definido la posición de observación (horario u antihorario), en forma continua mientras se registra la imagen del holograma.
- Observar la dinámica del cambio franjas resultantes.

Reglas válidas para la variación del ángulo de observación:

Contracción:

Si la deformación localizada del objeto se produce en sentido positivo (saliente del plano) y la rotación se realiza en sentido antihorario. Durante la reconstrucción dinámica de la imagen, se observará que las franjas se cierran sobre sí mismas cuando las franjas que representan la deformación en x se desplazan de derecha a izquierda.

Si la deformación localizada del objeto se produce en sentido negativo (concavidad) y la rotación se realiza en sentido antihorario. Durante la reconstrucción dinámica de la imagen, se observará que las franjas se abren cuando las franjas que representan la deformación en x se desplazan de derecha a izquierda.

Expansión:

Si la deformación es de tipo expansiva, aumento del tamaño del objeto, entonces las dos reglas anteriores se invierten.

5. Aplicación de la HID para la determinación.

Hasta aquí se ha combinado la HI de observación dinámica con la reconstrucción mediante simulación del patrón de interferencia en un HI.

La HID presenta limitaciones y diferencias notables con la HI. Desde el montaje óptico hasta la forma de reconstrucción encontramos diferencias sustanciales. Sin embargo, es posible replicar la metodología precedente para recuperar la dirección de las deformaciones localizadas durante la construcción del holograma digital. La posibilidad de hacerlo se relaciona fundamentalmente con la distribución de los elementos ópticos, en particular la posición del objeto en el holograma en línea de Gabor y su reconstrucción por Fourier. En la figura 2-33, se puede observar que el plano del objeto se ubica justo por debajo del plano que da origen al haz de referencia. Así, la rotación del plano del objeto deriva en el método más adecuado para obtener un patrón de franjas dinámico.

5.1. Rotación del plano del objeto.

Una alternativa práctica a la rotación del ángulo de observación aplicable a la HID, es la rotación del plano del objeto. Sin embargo esta operación produce el cambio de la posición de la bisectriz que define los ángulos de iluminación y observación. Por lo tanto, en la ecuación 2-52, tanto θ_i como θ_o cambiarían su magnitud al mantener fijas las trayectorias. Así, estos ángulos podrían tomar valores que van desde los 0° (cuando se superpongan las trayectorias de observación, iluminación y normal al plano) hasta los 90° de extensión máxima. Es evidente que bajo estas consideraciones los ángulos varían en forma complementaria.

En la secuencia de fotogramas de la figura 6-12, se observa claramente como el número de franjas varía en función de la magnitud de rotación del ángulo del objeto respecto del diagrama de rayos.

En el primer fotograma se puede observar como las deformaciones localizadas modulan el patrón de franjas dependiente de la deformación en x . Además, se visualiza que la distribución de las franjas verticales en torno a las circulares es diferente a las observadas en el resto de los fotogramas. Esto se debe a que la posición del objeto y los ángulos relativos se encuentran definidos en una condición que podemos denominar por debajo del ángulo de deformación pura en z o ángulo de referencia. Cuando el ángulo del objeto es de 10° respecto del sistema de coordenadas, se llega a la condición que determina la similitud entre el ángulo del haz de iluminación y el de observación. Se puede notar claramente la prevalencia de las franjas circulares y la desaparición de las verticales. Esto es debido a que las franjas ahora representan la deformación pura fuera del plano.

Continuando con el estudio de los fotogramas claramente se puede visualizar que a partir de estos diagramas es posible establecer una regla que explique el ordenamiento dinámico de las franjas.

Definición de las reglas que definen el sentido de la deformación en un HID.

Hasta aquí se ha utilizado una serie de simulaciones computacionales que permitieron definir el comportamiento de las franjas observadas en un HID.

Así, si se desea rescatar la información perdida en un HID se deberá:

- Encontrar deformaciones localizadas fuera del plano mediante la reconstrucción del HID.
- Asegurarse la existencia de superposición de deformaciones en x y z durante la construcción del holograma.
- Definir previamente el tipo de proceso de deformación, contracción o expansión.
- Definir el punto de partida de la rotación, respecto del ángulo de deformación pura en z .
- Rotar en sentido definido la posición de observación (horario u antihorario), en forma continua mientras se registra la imagen del holograma.

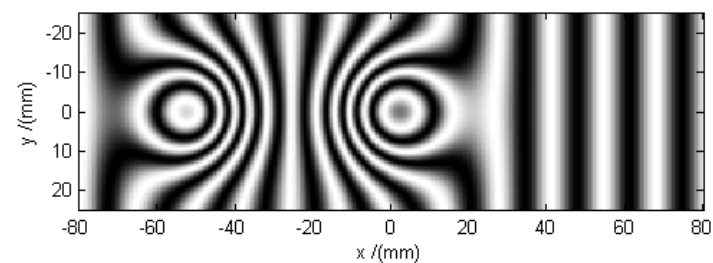
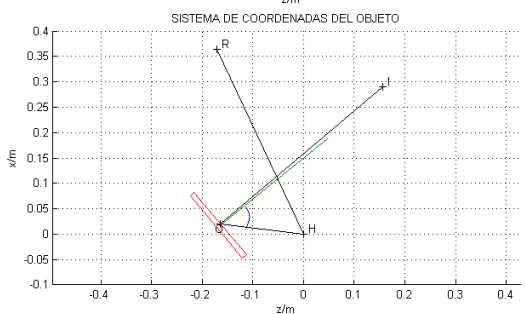
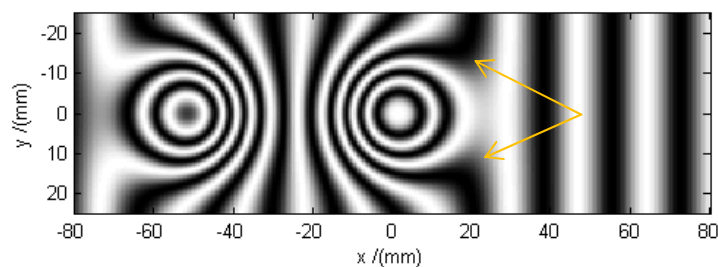
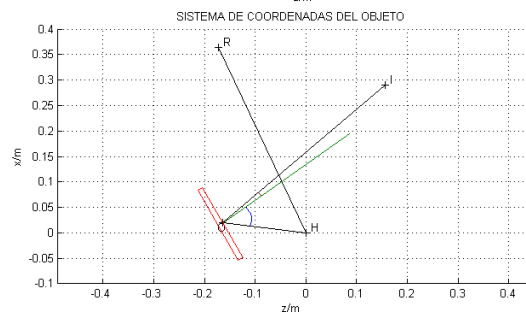
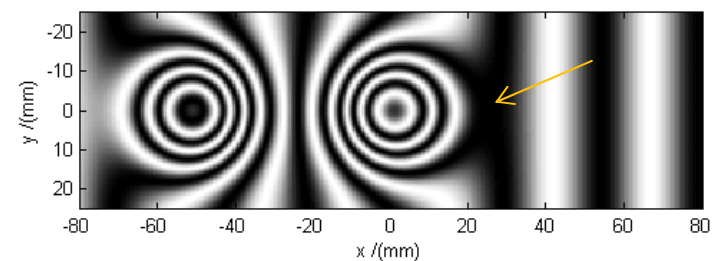
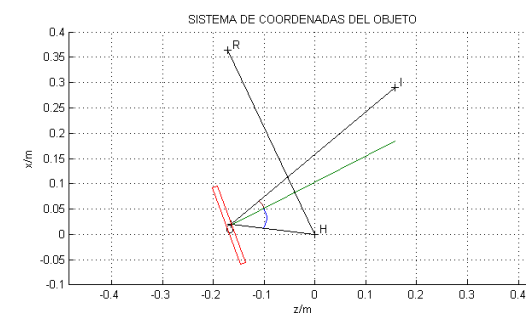
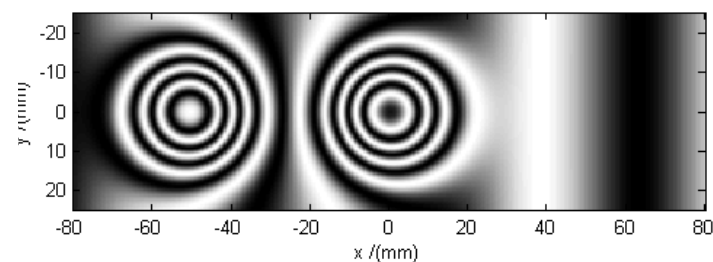
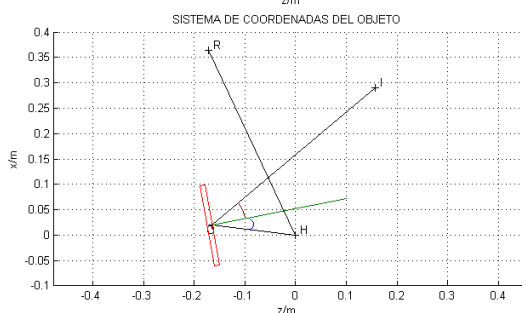
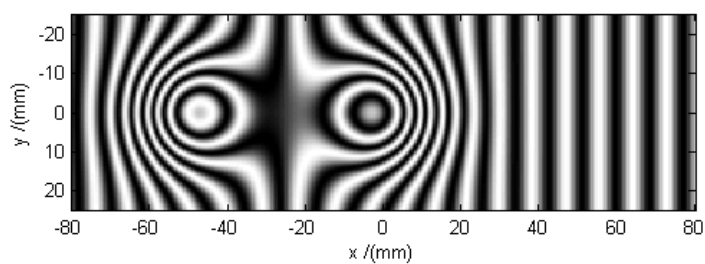
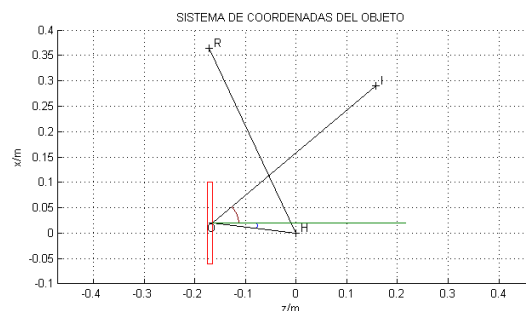


Figura 6- 12. Secuencia de fotogramas y gráficos que muestran la el resultado de la rotación del ángulo del objeto, respecto de un esquema de haces fijo. La primera imagen corresponde a un ángulo 0° respecto del plano vertical, incrementándose de 10° hasta alcanzar los 40° .

Rotación del plano del objeto:

Contracción:

Si la deformación localizada del objeto se produce en sentido positivo y la rotación en sentido antihorario, durante la reconstrucción dinámica de la imagen, se observará que las franjas se cierran sobre sí mismas. Esto siempre que en la observación se haya superado la posición angular en la cual los ángulos de observación e iluminación sean iguales.

Si la deformación localizada del objeto se produce en sentido negativo y la rotación en sentido antihorario, durante la reconstrucción dinámica de la imagen, se observará que las franjas se abren. Esto siempre que en la observación se haya superado la posición angular en la cual los ángulos de observación e iluminación sean iguales.

Expansión:

Si la deformación es de tipo expansiva, aumento del tamaño del objeto, entonces las dos reglas anteriores se invierten.

Regla general:

La inversión del sentido de rotación o de la deformación, generará la inversión en el sentido de apertura o cierre de las franjas.

El punto de fase 0° se encontrará siempre sobre la franja exterior de la zona de deformación localizada.

5.2. Construcción de HID mediante la variación del plano del objeto.

La HID al igual que la HI, contiene toda la información respecto del comportamiento de los objetos en un ensayo de interferometría holográfica. Como se mencionó anteriormente, los caminos para la recuperación son sustancialmente diferentes dependiendo en un caso de la observación y en el otro de la construcción del holograma.

Ahora se debe demostrar que ciertamente es factible mediante un proceso dinámico de construcción del holograma definir el sentido de la deformación. Así, la variación angular del plano deberá ser introducida contemporáneamente con la captura de los patrones de interferencia mediante el uso de la cámara. El resultado, una secuencia de fotogramas holográficos, podrán ser usados para construir un video en el cual sea posible estudiar el comportamiento dinámico de las franjas.

Mediante la aplicación de las reglas definidas en el punto anterior y de la observación del comportamiento dinámico de las franjas podrá finalmente construirse un diagrama de desenvolvimiento de fase representativo del comportamiento del objeto.

Adaptación del esquema óptico, construcción de un sistema robotizado para la rotación del plano del objeto.

En la figura 6-13, se puede observar un motor y la base circular sobre la cual se sostiene un objeto, en este caso un sensor bimetálico usado como elemento de protección térmico. Este tipo de interruptores térmicos tiene la capacidad de curvarse, formando una semiesfera, cuando su temperatura aumenta. Normalmente se los monta sobre superficies que deben soportar altas temperaturas. Cuando se alcanza la temperatura de accionamiento, el bimetálico presenta un radio tal que acciona un interruptor eléctrico cortando el suministro de energía.

Este tipo de objeto asegura una deformación pura en z con radio de curvatura creciente y positiva, formando una concavidad respecto del plano original del objeto a baja temperatura.

Si el objeto se monta sobre el eje del motor, entonces se obtiene una rotación pura del plano del objeto.

La rotación del plano del objeto tiene como consecuencia inmediata el cambio de los niveles de luz reflejados por el objeto. Independientemente del material usado, siempre existirá una componente de reflexión especular para un ángulo particular. En consecuencia, es posible que durante la obtención de cada uno de los HID particulares se deba compensar los niveles de intensidad luminosa del haz de referencia mediante la variación del ángulo de polarización.

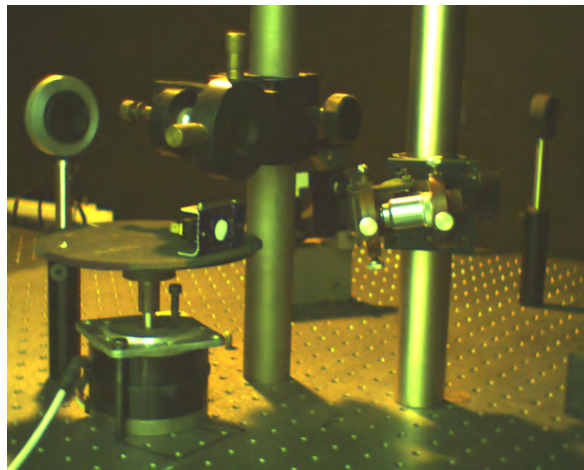


Figura 6- 13. Esquema usado para introducir la rotación del ángulo del objeto.

Rotación del ángulo de observación, caso deformación pura en z .

Tal como lo indica la fotografía de la figura 6-13, el objeto fue fijado sobre la base giratoria, de tal manera de introducir un desplazamiento angular y un desplazamiento lineal en x respecto del plano original. El objeto fue previamente calentado hasta una temperatura de 30 °C, con una temperatura ambiente de 17 °C. Desde la temperatura superior se dejó enfriar libremente el objeto tomando imágenes holográficas en intervalos de 1°C. Así, un total de 10 imágenes fueron obtenidas en cada secuencia. Se realizaron un total de tres secuencias con variaciones angulares de 1,4 °. Como punto de comparación se utilizaron los hologramas definidos como dos y tres de cada una de las secuencias realizadas. Entre ambas imágenes existió una diferencia de temperatura de 1°C, tomado en la parte alta del intervalo establecido.

Comparando iguales intervalos de temperatura con posiciones angulares similares los resultados de cada una de las series fueron totalmente coincidentes.

El resultado obtenido indica una variación en la fase relativa de cada franja respecto de la posición angular, conservándose el número total de estas. Nuevamente, como había sido observado en los procesos de simulación, una rotación en el ángulo del plano del objeto cuando la deformación es pura en z no introduce cambio en el número de franjas.



Figura 6- 14. Secuencia de tres HID correspondientes a posiciones angulares de 0°, 1,4° y 2,7°.

Si bien el número de franjas permanece constante la fase relativa es diferente y esto se encuentra relacionado con pequeñas indeterminaciones en la medición de temperatura.

Los hologramas reconstruidos, con imágenes bien definidas, indican el comportamiento del bimetalico. Sin embargo en éste caso no es posible definir el sentido de la deformación y por lo tanto el diagrama de demodulación de fase sería la única herramienta disponible. A diferencia del objeto de la figura 6-2 (a), aquí es fácilmente identificable el punto de fase 0° , coincidente con el plano original del objeto (Borde del bimetalico).

Conociendo el punto de fase 0, el diagrama de demodulación de fase reproduce automáticamente el sentido de la deformación.

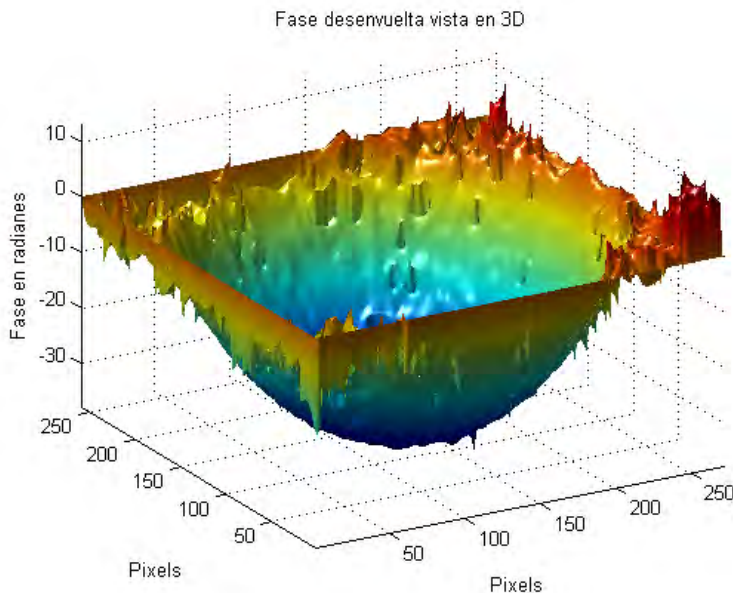


Figura 6- 15. Diagrama de fase demodulada de la superficie del bimetalico tomándose como referencia el borde exterior de la imagen.

Rotación del plano del objeto con deformación bidimensional.

De las simulaciones mostradas anteriormente, quedó demostrada la posibilidad teórica de observar un cambio dinámico en la distribución de las franjas al rotar el plano del objeto. Además, se demostró que para que el efecto dinámico aportara información sobre el sentido de la deformación, se debían introducir variaciones en al menos dos dimensiones de la morfología del objeto. Evidentemente una de ellas debía ser la dirección z , con sentido positivo o negativo. Al combinar esta con una deformación en x se obtenía el sentido del vector deformación en z .

Un dispositivo que presenta una deformación o desplazamiento puro en z y que por sus características constructivas combinaría más de una deformación, es un parlante de audio de pequeñas dimensiones. Este, al ser excitado mediante una fuente de tensión continua de bajo nivel de rizado, presenta un desplazamiento hacia afuera o hacia adentro del plano, dependiendo de la polaridad del mismo.

El material con el cual se encuentra construido el cono del altavoz no presenta un alto grado de homogeneidad en su superficie, por lo cual es de esperarse la existencia de tensiones superficiales cuando actúa sobre este una fuerza particular. Dichas tensiones generarían la combinación de más de una componente de deformación, pero con preponderancia de un desplazamiento en z .

A diferencia de la operatoria realizada sobre el bimetalico, se prescindió del uso del sistema de rotación robotizado.

El esquema óptico debió ser alterado buscando aumentar la distancia entre la cámara y el objeto dada sus dimensiones.

El parlante fue finalmente ubicado sobre una base magnética y la rotación se generó manualmente.

Como complemento, el ángulo de rotación fue medido mediante la localización de una cámara en altura, la cual permitía obtener una vista superior del esquema.

Como mecanismo de excitación, se utilizó una fuente de laboratorio tensión variable que permitía definir los niveles de corriente consumidos por el parlante. Inicialmente se obtuvieron HID de referencia que permitieran definir un conjunto de franjas claramente visibles, como se muestra en la figura 6-16.

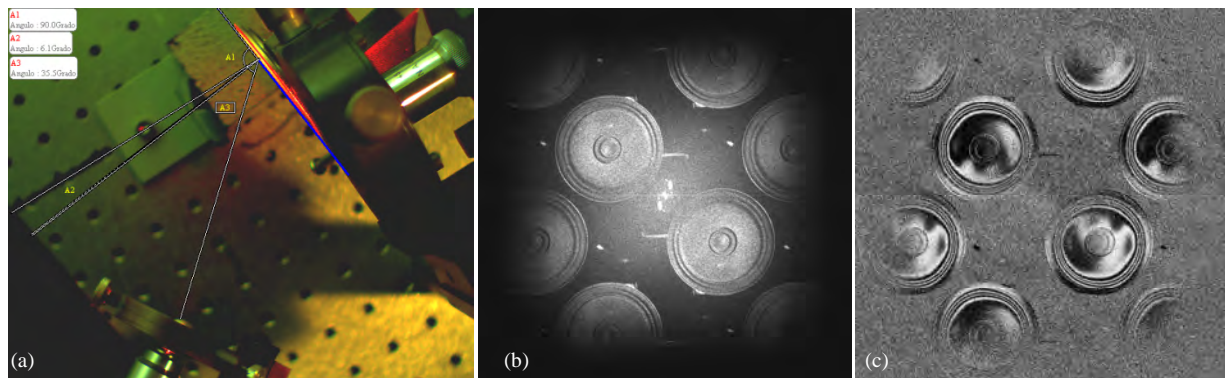


Figura 6- 16. (a) Ejemplo de medición de ángulos de observación e iluminación respecto del plano del objeto. (b) Holograma digital resultante. (c) HID correspondiente a una diferencia de potencial de 3V.

Posteriormente a la obtención de las imágenes de referencia, se procedió con la calibración del nivel de deformación que permitiera observar franjas relacionadas con deformaciones localizadas y la traslación del cono. Así, las deformaciones localizadas contendrían información de desplazamientos en dos dimensiones (x,z), los cuales deberían aportar información respecto del sentido de la deformación.

Ensayando diferentes potenciales de excitación del parlante se obtuvieron HID que permitieron definir el punto de trabajo.

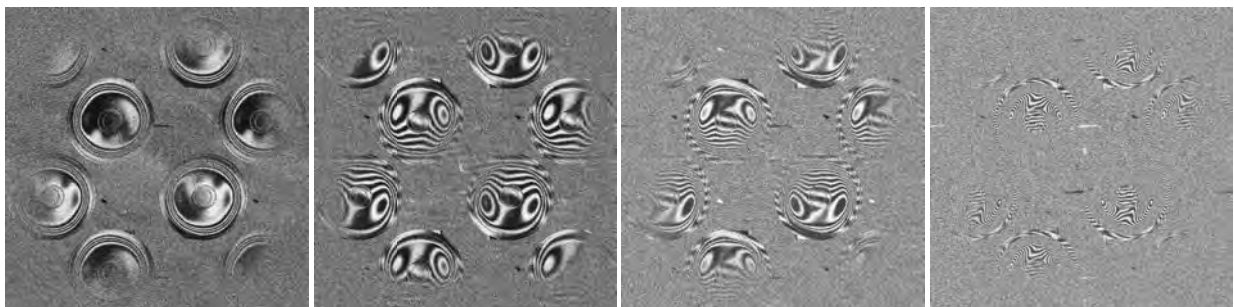


Figura 6- 17. Secuencia de 4 diferentes intervalos de excitación de la bobina del parlante, con niveles de tensión creciente, para un arreglo óptico equivalente al de la figura 6-16.

De la secuencia de HID obtenidos, vemos que el segundo y tercer hologramas son los que muestran claramente deformaciones localizadas. Información adicional respecto de la distribución de fases, puede ser obtenida mediante los diagramas de demodulación de fase. Estos muestran claramente el desplazamiento del cono del parlante, particularmente bien cuando los desplazamientos son pequeños.

En estos casos, la imagen permitió obtener diagramas de demodulación de fase sumamente claros, con un nivel de speckle reducido e indicando el sentido de deformación fuera del plano del cono del parlante. Debe tenerse en cuenta que es conocida la posición de fase 0° correspondiente al aro de soporte del cono.

Por otra parte, resultan visibles los sentidos de las deformaciones localizadas, hacia afuera y hacia adentro del plano con sesgos hacia el eje x.

De igual manera que en el caso anterior, el diagrama de fase demodulada es suficiente para la recuperación de la información que hubiese sido sacrificada en un HI. Sin embargo podemos

además agregar información adicional respecto de las deformaciones localizadas mediante la rotación.

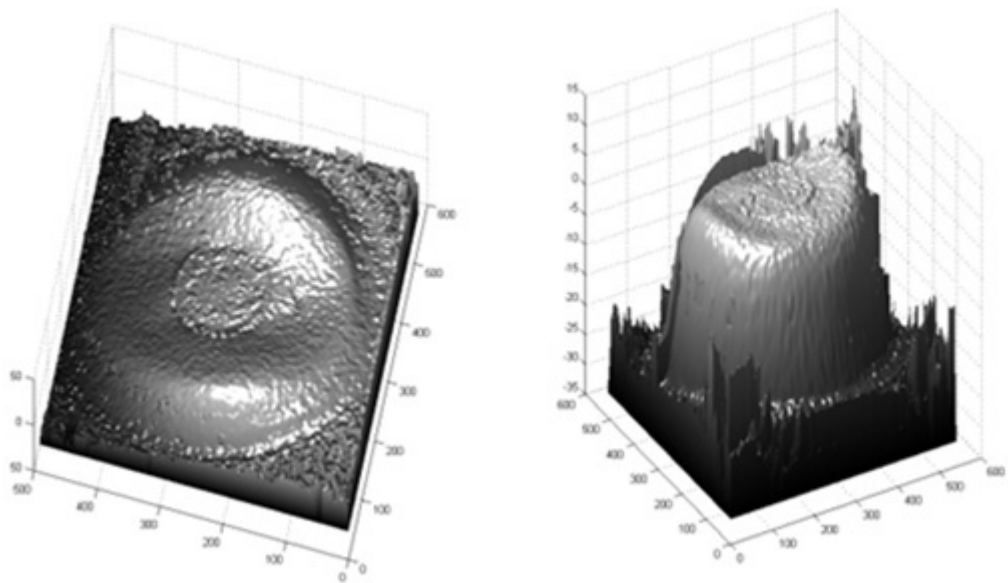


Figura 6- 18. Diagrama de demodulación de fase correspondiente al primero y segundo HID de la figura 6-17, tomándose como punto de fase 0 el centro del cono.

Comprobación del sentido de la deformación mediante HID

Habiendo realizado un conjunto de experiencias previas sobre el parlante en las cuales fue posible definir una estructura de franjas combinadas, se implementó la obtención de la misma imagen de HID con un nivel de excitación constante pero con diferentes ángulos en el plano del objeto. Los ángulos usados en cada uno de los HID se encuentran tabulados en la tabla 1-6.

Tabla 1-6. Medición de los ángulos de rotación, observación e iluminación.

	Normal al plano.	Rotación.	Iluminación.	Observación.	HID
	90°	1.7°	33,2°	10,6°	
	90°	8.3°	24,1°	18°,8	
	90°	10,5°	22,7	20,1°	
	90°	16°	16,7°	25,6°	

De la observación de los HID resultantes se pueden definir claramente zonas de desplazamiento fuera del plano con sentidos positivos o negativos. En la figura 6-19, correspondiente a una

ampliación de la imagen 1 de la tabla, se indican zonas que ante un estudio dinámico del ángulo de rotación, muestran un cierre de las franjas sobre sí mismas, indicadas con flecha azul. Con una flecha de color rojo se muestran las franjas que muestran un comportamiento expansivo. Las franjas correspondientes al borde del aro muestran en todo momento un comportamiento expansivo ante la rotación. Tomando estas como referencia podemos afirmar entonces que aquellas franjas que se expanden se corresponden con un desplazamiento positivo fuera del plano, dado que el ángulo de iluminación es mayor al ángulo de observación. En el cuarto holograma de la tabla, se ha superado la condición de igualdad entre los ángulos de observación e iluminación por lo cual las franjas deberían seguir, de haberse obtenido un mayor número de hologramas, un ordenamiento constrictivo. Esto, en total coincidencia con lo demostrado mediante simulaciones.

6. Recuperación de la información perdida.

En capítulos precedentes hicimos notar que existían diferentes tipos de hologramas convencionales en los cuales se podían observar comportamientos particulares. Estos, podían ser observados cuando se producía la rotación del ángulo de observación. Tempranamente supusimos que este tipo de comportamiento podría estar relacionado con el sentido de la deformación cuando esta se produce fuera del plano del objeto. Esta hipótesis, de corroborarse, permitiría rescatar lo que se denomina información perdida o pérdida de selectividad espacial en los HI.

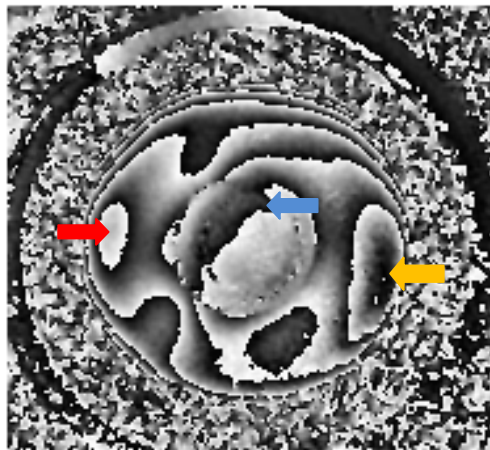


Figura 6- 19. Zona de deformación fuera del plano positiva indicada con una flecha roja. Zona de deformación fuera del plano negativa indicada con flecha azul. Zona de deformación pura en z en la cual no es posible definir el sentido de la deformación, flecha amarilla.

En este capítulo desarrollamos una serie de estrategias tendientes a demostrar esta hipótesis. Inicialmente se recurrió a los HI, en los cuales se observaba este comportamiento y se los relacionó con diferentes experiencias de HID. Se recurrió a simulaciones de fenómenos de interferencia fundamentales y se desarrollaron simulaciones que permitieran reproducir lo que matemáticamente indicaba ser una posibilidad cierta para la recuperación de esta información. Finalmente se implementó una experiencia en la cual se pudieran desarrollar fenómenos dinámicos de características similares a los mostrados en las simulaciones. Así, la hipótesis planteada inicialmente queda fehacientemente demostrada, dando lugar a todo un nuevo espectro de posibles aplicaciones.

Combinar las técnicas de HI y de HID resulta indispensable a la hora de un análisis detallado del comportamiento de la pieza bajo estudio. Primeramente la HI permite obtener una imagen de alta definición en la cual es posible observar el comportamiento del objeto. La rotación del ángulo de observación da como resultado la identificación de zonas de deformación localizada. Estas, analizadas dinámicamente nos permiten determinar el sentido de la deformación. Posteriormente, mediante HID es posible analizar la zona de mayor interés a partir de la magnificación de la imagen. La rotación del plano del objeto permitirá corroborar lo visto en la observación dinámica

del HID. Finalmente, la reconstrucción de la imagen de fase del HID y la demodulación de la misma permiten obtener una cuantificación directa de la deformación del objeto bajo estudio. Así la combinación de las técnicas de HI y de HID, permiten reconstruir el 100 % de la información contenida en los hologramas.

7. Combinación de las técnicas de holografía convencional y digital.

Hasta aquí hemos hecho una somera descripción tanto de la holografía convencional como de la holografía digital. Además, hemos detallado como obtener hologramas interferométricos tanto en su forma fotográfica como digital. Finalmente hemos realizado un análisis de la interpretación de las franjas así como también su cuantificación y la recuperación de la información. De todo lo antes dicho, surgen diferencias y características propias de cada uno de los métodos. La más importante de ellas, proviene del esquema óptico aplicable en cada caso. Como vimos la HID presenta serias limitaciones tanto en el montaje como en el tamaño del objeto que no son atribuibles a la holografía fotográfica.

De las diferencias propias de cada uno de los métodos surgen las diferentes posibilidades de combinación entre ambos, siendo en todos los casos ensayos complementarios.

7.1. Análisis interferométrico de grandes objetos.

En el Capítulo II indicamos cual debían ser las dimensiones máximas del objeto cuando se trabaja en HD. Evidentemente dependiendo del tamaño del objeto, la cámara deberá situarse a una distancia importante de este. Así un objeto de dimensiones mayores a unos cuantos centímetros, obligará a utilizar esquemas ópticos muy extendidos y particularmente imprácticos. Una alternativa a este problema es la utilización de la combinación de ambos métodos. La holografía convencional no presenta limitaciones mayores tanto del sistema óptico como del tamaño del objeto. Lógicamente que tanto la potencia del láser como el tamaño de la película definen el campo visual del holograma. Sin embargo para objetos del tamaño de la película o placa no existirían inconvenientes. Así, se podría realizar un primer análisis del comportamiento del objeto a la deformación inducida mediante holografía convencional, con el fin de detectar las zonas de mayor interés. Encontradas las zonas de deformación, tensión, quiebre etc. mediante técnicas de escaneo holográfico [Ferreira, 2012] se puede aplicar HID para el estudio del comportamiento del objeto.

Consideremos como ejemplo el ensayo realizado sobre la parte E de un núcleo de transformador, que fuera documentado en el Capítulo III. En este ensayo se introdujeron deformaciones mediante inducción térmica con el fin de detectar tensiones residuales originadas en el corte mediante cizalla. En la figura 6-20 (a) de ese capítulo se puede observar claramente la existencia de una deformación pura en z , en el ángulo interior superior izquierdo de la pieza. Esta deformación fue atribuida a la existencia de una tensión residual debida al corte.

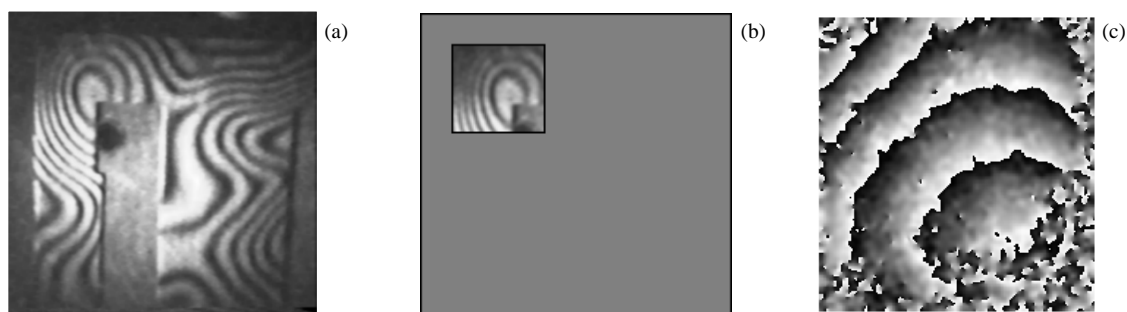


Figura 6- 20 . (a) Holograma interferométrico convencional correspondiente a una parte E de núcleo de transformador. (b) Ventana de captura propuesta. (c) HID de la zona de interés.

Con el fin de obtener mayor información del comportamiento de esta zona, se podrían ensayar un número grande de muestras mediante HID, dado que HI solo permitió hacerlo en un número limitado de estas. Mediante la utilización de una ventana de captura, Figura 6-20 (b), es posible aplicar HID independizándose de las dimensiones del objeto.

Así, se podrían combinar ambos métodos para maximizar la información aportada por los ensayos.

7.3. Hologramas sobrepuestos.

Cuando las dimensiones del objeto lo permiten, podría aplicarse un ensayo de hologramas sobrepuestos. Para esto, el esquema óptico debería presentar ciertos cambios de manera de poder hacer coincidir tanto el haz del objeto como el de referencia sobre la cámara de CCD y en la película holográfica. Evidentemente el esquema a utilizar sería el de Fourier de haz sobrepuesto, desarrollada y documentada precedentemente.

La utilización de esta técnica permitiría obtener contemporáneamente en dos medios de registro diferente del mismo interferograma, pero con la posibilidad de implementar acciones como la rotación de la cámara usada en la observación.

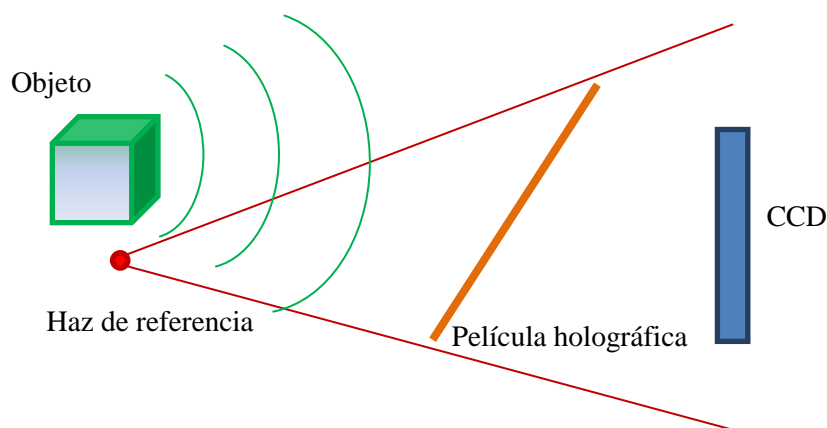


Figura 6- 21. (a) Esquema sugerido para la combinación de ambas técnicas HID y HI, la película debe ubicarse por delante del CCD buscando un ángulo respecto del eje óptico diferente a 90°.

Como aspectos particulares se debería considerar la variación de los niveles relativos de intensidad del haz de referencia y del haz del objeto para cada uno de los casos. Mientras que en HC la relación debe ser 8:1 en HD debe ser 1:1. La utilización de polarizadores antes del filtro espacial usado en el haz de referencia es la opción más viable. Esta limitación hace que no puedan ser registrados hologramas donde la inducción de la deformación no pueda ser controlada específicamente.

Otro limitante, sería la imposibilidad de utilizarse placas holográficas de acetato, dado que el portaplacas debería ser transparente para no generar variaciones en los frentes de onda que inciden sobre la cámara.

7.4. Determinación de la magnitud de la deformación, método inverso.

En holografía fotográfica el principal problema a la hora de inducir una deformación particular, radica en los tiempos asociados para la obtención de cada holograma. Es normal que entre los tiempos de montaje óptico, la obtención del holograma de calibración (holograma del objeto sin introducir la deformación), la optimización del proceso de revelado y finalmente la observación se deban emplear ciclos de trabajo de entre 6 y 8 horas. Si no es posible definir en una serie acotada de hologramas la magnitud de la deformación, el tiempo y los recursos económicos empeñados pueden ser importantes. Es así que por su naturaleza y la posibilidad de definir la deformación en un rango

aceptable, es que fue usada la variación térmica del objeto en la mayor parte de los trabajos presentados en el Capítulo II. Sin embargo, en todos los casos se sacrificó la selectividad espacial [Caufield, 1979].

Una alternativa a esta problemática es definir la magnitud de la deformación, sea del tipo que fuera, mediante la utilización de la HID. Dado que los tiempos de montaje y finalmente de obtención del interferograma se reducen notablemente, es sumamente práctico definir con esta metodología la magnitud deseada. Una vez obtenida esta, entonces es posible proceder con la obtención del HI, empuñando un mínimo de recursos y tiempo.

Capítulo VII: Conclusiones

Conclusiones.

1. De los conceptos fundamentales de la HI y de la práctica de la holografía, se desarrollaron una serie de ecuaciones en las cuales se relacionan el cambio en las dimensiones del objeto, con el cambio de fase entre los frentes de onda y las características constructivas del esquema óptico. Estas ecuaciones permiten modelar y simular la formación de franjas resultantes en la HI.
2. La utilización de una cámara de CCD y la construcción de un brazo robotizado para fijar el punto de observación es la forma más adecuada para la obtención de resultados cuantitativos, dado que permite definir las coordenadas del observador.
3. La HI fotográfica resulta ser una herramienta aplicable a diferentes tipos de ensayos no destructivos, particularmente en ensayos de tipo cualitativo. Su principal limitación se relaciona con la imposibilidad de la definición del sentido del vector deformación, cuando se induce una deformación libre en el objeto.
4. Los métodos dinámicos o estáticos de inducción de las deformaciones, son igualmente aplicables en HI. Acotar las magnitudes de las fuentes que dan origen a la deformación resulta ser el principal limitante de este tipo de ensayo no destructivo.
5. El uso de la dilatación térmica como método estático de inducción resultó una forma adecuada en el estudio de piezas metálicas, dado el conocimiento previo de las magnitudes de deformación relacionadas con la temperatura.
6. Los análisis cualitativos realizados sobre diferentes objetos metálicos permitieron definir los tipos de deformaciones y sus orígenes. Tensiones residuales provenientes de procesos de construcción o derivadas de procesos de fabricación pudieron ser perfectamente discriminadas.
7. La combinación de análisis cualitativos, cuantitativos y simulaciones por ordenador, permitieron definir un tipo de deformación inesperado sobre una de las probetas metálicas de acero AISI 304. Evidenciándose las limitaciones en la definición del sentido del vector deformación.
8. La alternativa de inducir deformaciones mediante ondas de sonido, resultó igualmente práctica y aplicable cuando los objetos presentan libertad de movimiento. Se estudió como alternativa al uso de altavoces, el uso de un pequeño buzzer de frecuencia constante, dando lugar a la denominada inducción localizada de la deformación por ondas de sonido.
9. De la combinación de HI y MEF, se ha observado una concordancia limitada entre el comportamiento simulado y el comportamiento medido de una membrana vibrante. Resultado que se podría concluir como previsible a partir de las diferencias entre modelos ideales y condiciones reales.
10. La utilización de fuentes de sonido de baja intensidad resultó un método adecuado menos invasivo y sin efectos colaterales, para el estudio del estado de conservación de una pintura

de interés patrimonial. Este método introduce una mejora considerable respecto de la utilización de fuentes de calor.

11. De los conceptos fundamentales de HD, se diseñó e implementó un esquema óptico alternativo, lográndose la reducción del número de componentes ópticos utilizados, una mayor facilidad de regulación de los niveles de intensidad relativos entre los frentes de onda y una forma de garantizar un igual radio de curvatura del haz del objeto y del haz de referencia, condiciones indispensables para la reconstrucción del holograma de Fourier sin lentes.
12. De la aplicación de este esquema óptico alternativo y de la reconstrucción de los primeros hologramas de amplitud, quedó en evidencia la capacidad de este esquema óptico de reproducir el espectro espacial, con más de dos armónicos de orden superior. Así, pudimos obtener la imagen real, la imagen virtual e imágenes armónicas de hasta un tercer orden. Tal como se mostró oportunamente, los denominados gemelos [Schnars, 2005], pueden dificultar la interpretación del holograma cuando las imágenes espectrales resultan sobrepuestas.
13. Para eliminar la superposición de imágenes espectrales se desarrolló un modelo matemático que permite definir la posición de estas en función de la posición del objeto y del haz de referencia. Así, el holograma digital puede ser construido en función de la posición deseada de la imagen.
14. La utilización de filtros digitales no resulta ser una herramienta de fundamental importancia en el mejoramiento de la imagen de amplitud de un HD, obteniéndose algún resultado a partir de los denominados filtros de reducción de ruido. Por el contrario, en las imágenes de fase la aplicación de filtros seno-coseno [Cuevas, 2010] permiten mejorar notablemente el contraste de las franjas de interferencia en un HID.
15. En los ensayos por HID la determinación de la magnitud y tipo del método de inducción de la deformación se ve simplificado notablemente respecto de la HI. La principal ventaja es la velocidad de procesamiento para la reconstrucción de la imagen que permite poco tiempo una gran cantidad de hologramas.
16. No se encuentran limitaciones en la forma de inducción de deformaciones estáticas. Sin embargo, la inducción dinámica debe respetar la velocidad de adquisición de la cámara. Frecuencias bajas pueden producir imágenes correspondientes a estados intermedios del desplazamiento o incluso la destrucción del holograma. Con cámaras de alta velocidad, podrían inducirse deformaciones dinámicas y un análisis en tiempo real.
17. Si bien el análisis cuantitativo del HID es similar al aplicado en HI, la magnitud de la deformación relacionada con el cambio total de fase se independiza de la posición del observador, siendo únicamente dependiente de dos ángulos fijos y definidos durante la construcción (observación e iluminación). Así, el diagrama de demodulación de fase aporta información extraordinaria respecto de la HI.
18. Los ensayos no destructivos mediante HID, demostraron su velocidad de aplicación. Resultando particularmente útiles en la determinación de deformaciones localizadas.
19. La detección de grietas o fisuras mediante HID presenta posibles limitaciones en la localización. El nivel de speckle es determinante en el proceso de estudio, dado que las franjas de interferencia se ven fuertemente condicionadas en su definición. La utilización del

diagrama de fase demodulada resulta útil cuando es aplicado uno de los métodos, pero los resultados difieren según el algoritmo aplicado.

20. El máximo potencial de la HID se alcanza en ensayos de tipo cuantitativo, sin embargo en todos los casos el área de obtención de resultados es relativamente pequeña. La combinación de los métodos HI y HID es la principal alternativa de solución.
21. Se propone como método alternativo para la recuperación de la selectividad espacial en los HI la rotación del ángulo de observación y la observación dinámica del holograma. Mediante simulaciones se establecieron reglas que relacionan el giro de rotación con un tipo de deformación localizada fuera del plano, cuando coexisten estas y una deformación lineal en x . El resultado de las simulaciones resulta coincidente con la observación de un holograma mediante este método.
22. Se propone como método alternativo para la recuperación de la selectividad espacial en los HID la rotación del ángulo del plano del objeto. Mediante simulaciones se establecieron reglas que relacionan el giro de rotación con un tipo de deformación localizada fuera del plano, cuando coexisten estas y una deformación lineal en x . El resultado de las simulaciones resulta coincidente con la observación de hologramas construidos aplicando este método.
23. La combinación de los métodos de HI y HID toma una nueva dimensión dado que: mediante la observación dinámica de los HI es posible definir puntos de deformación localizada fuera del plano y los sentidos de deformación correspondiente. Mediante la aplicación de la HID es posible definir la magnitud de estas deformaciones, además de darle sentido al diagrama de demodulación de fase.

Bibliografía

- [Abramson, 1969] Abramson, N. The Holo-Diagram: a Practical Device for Making and Evaluating Holograms. *Applied Optics*, 8(6):1235-1240. (1969).
- [Abramson, 1973] Abramson, N. H. and Bjelkhag, H. Industrial holographic measurements. *Applied Optics*, 12(12):2792-2796. (1973).
- [Amado, 2011] Amado Paz, J. M. *Recubrimientos cerámicos de matriz metálica*. Tesis doctoral, Universidade da Coruña. (2011).
- [Asmus, 2003] Asmus, J. F. Non-divestment laser applications in art conservation. *Journal of Cultural Heritage*, 4:2898-2938. (2003).
- [Biedermann, 1970] Biedermann, K. and Molin, N. E. Combining hypersensitization and rapid in situ processing for time-average observation in real-time hologram interferometry. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 3(9):669-680. (1970).
- [Caufield, 1979] Caufield, H. *Handbook of optical Holography*. Academic Press, New York. (1979).
- [Chatelain, 1973] Chatelain, B. Holographic photo-elasticity: independent observation of the isochromatic and isopachic fringes for a single model subjected to only one process. *Optics and Laser Technology*, 5(5):201-204. (1973).
- [Cuevas, 2010] Cuevas, E., Zaldivar, D., and Pérez, M. *Procesamiento Digital de Imágenes con Matlab y Simulink*. Alfaomega, Mexico. (2010).
- [Ferreira, 2012] Ferreira, C., Garcia, J., and Mico, V. Two-dimensional lensless object scanning holography. In Doval, AF and Trillo, C and LopezVazquez, JC, editor, *SPECKLE 2012: V INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPECKLE METROLOGY, volume 8413 of Proceedings of SPIE. 5th International Conference on Speckle Metrology (Speckle)*, Vigo, SPAIN, SEP 10-12, 2012.
- [Gombkőto et al., 2002] Gombkőto, B., Kornis, J., and Fuzessy, Z. Difference displacement measurement using digital holography. *Optics Communications*, 214(1-6):115-121. (2002).
- [Hariharan, 1996] Hariharan, P. *Optical holography: principles, techniques, and applications*. Cambridge studies in modern optics. Cambridge University Press, 2nd edition. (1996).
- [Heshmat, 2013] Heshmat, S., Tomioka, S., and Nishiyama, S. Phase extraction and unwrapping using rotational and direct compensators for digital hologram. *Optical Engineering*, 52(10). (2013).
- [Hipp, 2004] Hipp, M., Woisetschlager, J., Reiterer, P., and Neger, T. Digital evaluation of interferograms. *Measurement*, 36(1):53-66. (2004).

- [Hossain, 2007] Hossain, M. M., Sheoran, G., Mehta, D. S., and Shakher, C. Contouring of difused objects by using digital holography. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(6):684-689. (2007).
- [Karray, 2012] Karray, M., Poilane, C., Mounier, D., Gargoury, M., and Picart, P. Inves-tigation of crack initiation with a three color digital holographic interferometer. In Doval, AF and Trillo, C and LopezVazquez, JC, editor, *SPECKLE 2012: V INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPECKLE METROLOGY*, volume 8413 of *Proceedings of SPIE. 5th International Conference on Speckle Metrology (Speckle)*, Vigo, SPAIN, SEP 10-12, 2012.
- [Kreis, 2004] Kreis, T. *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*. Wiley-VCH Verlag GmbH. (2004).
- [Kreis, 1997] Kreis, T. M. and Jüptner, W. P. O. Suppression of the dc term in digital holography. *Optical Engineering*, 36(8):2357-2360. (1997).
- [Lauterborn, 1993] Lauterborn, W., Kurz, T., and Wiesenfeldt, M. *Coherent Optics: Fundamentals and Applications*. Advanced Texts in Physics. Springer-Verlag, Berlin, Germany. (1993).
- [Li, 2009] Li, C. and Zhu, D. Y. A residue-pairing algorithm for insar phase unwrapping. *Progress in Electromagnetics Research*, 95:341-354. (2009).
- [Ludman, 2002] Ludman, J., Caulfeld, H. J., and Riccobono, J. *Holography for the New Millennium*. Springer Verlag, New York. (2002).
- [Ma, 2012] Ma, L., Li, Y., Wang, H., and Jin, H. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping in digital holographic microscopy. *Applied Optics*, 51(36):8800-8807. (2012).
- [Maaboud, 2010] Maaboud, N. F. A., El-Bahrawi, M. S., and Abdel-Aziz, F. Digital holography in fatness and crack investigation. *Metrology and Measurement Systems*, 17(4):583-587. (2010).
- [McElhinney, 2008] McElhinney, C., Hennelly, B. M., Ahrenberg, L., and Naughton, T. J. Removing the Twin Image in Digital Holography by Segmented Filtering of In-focus Twin Image. In Awwal, AAS and Iftekharuddin, KM and Javidi, B, editor, *OPTICS AND PHOTONICS FOR INFORMATION PROCESSING II*, volume 7072 of *Proceedings of SPIE. Conference on Optics and Photonics for Information Processing II*, San Diego, CA, AUG 13-14, 2008.
- [Osten, 2012] Osten, W., Wilke, M., and Pedrini, G. Remote Laboratories for Optical Metrology: From the Lab to the Cloud. In Doval, AF and Trillo, C and LopezVazquez, JC, editor, *SPECKLE 2012: V INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPECKLE METROLOGY*, volume 8413 of *Proceedings of SPIE. 5th International Conference on Speckle Metrology (Speckle)*, Vigo, SPAIN, SEP 10-12, 2012.
- [Powell, 1965] Powell, R. and Stetson, K. Interferometric vibration analysis of 3-dimensional objects by wavefront reconstruction. *Journal of the Optical Society of America*, 55(5):612. (1965).
- [Pryputniewicz, 1976] Pryputniewicz, R. and Stetson, K. A. Holographic strain analysis-extension of fringe-vector method to include perspective. *Applied Optics*, 15(3):725-728. (1976).

- [Resnick, 1999] Resnick, R., Halliday, D., and Krane, K. S. *Física*. Compañía Editorial Continental, México. (1999).
- [Schnars, 2005] Schnars, U. and Jüptner, W. Digital Holography: *Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. (2005).
- [Tornari, 2006] Tornari, V. Optical and digital holographic interferometry applied in art con-servation structural diagnosis. *e-Preservation Science*, 3:51-57. (2006). <http://www.morana-rtd.com/e-preservation-science/2006/Tornari-01-12-06.pdf>
- [Tornari, 2007] Tornari, V. Laser interference-based techniques and applications in structural inspection of works of art. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387(3):761-780. (2007).
- [Valin, 2005] Valin, J. L., Goncalves, E., Palacios, F., and Perez, J. R. Methodology for analysis of displacement using digital holography. *Optics and Lasers in Engineering*, 43(1):99-111. (2005).
- [Valin, 2009] Valin Rivera, J. L., Monteiro, J. M., Lopes, H. M., Vaz, M. A. P., Palacios, F., Goncalves, E., del Pino, G. G., and Ricardo Perez, J. Proposal for underwater structural analysis using the techniques of espi and digital holography. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(11):1139-1144. (2009).
- [Van Deelen, 1969] van Deelen, W. and Nisenson, P. Mirror blank testing by real-time holographic interferometry. *Applied Optics*, 8(5):951-955. (1969).
- [Zhang, 2014] Zhang, Y., Wang, S., Ji, G., and Dong, Z. An Improved Quality Guided Phase Unwrapping Method and Its Applications to MRI. *Progress in Electromagnetics Research*, 145:273-286. (2014).

ANEXO-1. Publicaciones

Improvements in the analysis of diffraction phenomena by means of digital images

A. Ramil^{a)} and A. J. López

Departamento de Enseñaría Industrial II, Universidade da Coruña, E15403 Ferrol, A Coruña, Spain

F. Vincitorio

Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, Almafuerde 1033, Paraná, Entre Ríos, Argentina

(Received 15 February 2007; accepted 14 July 2007)

We introduce a simple methodology employing digital photography and image processing techniques to do a quantitative study of diffraction. To enhance the range of intensities recorded by a CCD camera without saturation, digital images of the diffraction patterns taken at different exposure times are combined pixel by pixel, and the measured values of the light intensity are fitted to theoretical curves. Diffraction by a single slit, a double slit, and a circular hole were analyzed to obtain quantitative results and demonstrate that the methodology is suitable for student laboratories. © 2007 American Association of Physics Teachers.
[DOI: 10.1119/1.2772288]

I. INTRODUCTION

The use of digital image techniques to demonstrate basic concepts in physics was initiated in the 1990s¹⁻⁶ and has increased recently due, in great part, to the low cost of digital cameras and the development of digital image processing software.⁷⁻¹⁹

One of the limitations of digital cameras, especially in the field of optics, is the possibility of saturation of the pixel signals. This problem has been alleviated in some cases by using filters to reduce the intensity of the light reaching the CCD.⁴⁻⁷ In diffraction there are great differences between the intense central spot and secondary maxima, and thus the use of filters can lead to a loss of information about the less intense areas and make it difficult to do a quantitative analysis.

The methodology proposed in this paper for the analysis of diffraction is based on the combination, pixel by pixel, of images with exposure times that are adequate for measuring the different intensity levels in the pattern. Most digital cameras record images in a JPEG file, which can be read by photoediting software, which works with the 24 bits in RGB format or 8 bits in grayscale. By combining the different images it is possible to enhance the range of intensities over the 8 bits and thus obtain the intensity profile of the complete diffraction pattern.

The aim of this paper is to improve the quality of student experiments on diffraction by using a simple methodology that exploits the advantages of digital techniques to record diffraction patterns and to manipulate image files. Simple calibrations let students convert pixel numbers to position to high accuracy and thereby perform a quantitative analysis of the intensity profiles by fitting them to theoretical curves.

II. EXPERIMENTAL SETUP

A schematic of the experimental setup to obtain images of the diffraction patterns is shown in Fig. 1. We used a Uniphase 0.5 mW, $\lambda=632.8$ nm He-Ne laser with random polarization and transverse mode TEM₀₀. To increase the laser divergence and ensure a uniform illumination of the slit, a divergent lens ($f=-100$ mm) was employed. Images of the diffraction patterns were obtained by using a Nikon D100

digital camera with exposure times ranging from 30 to 1/4000 s and an objective Nikon micro 60/2.8. The CCD of the camera consists of 6.1×10^6 pixels and presents an active area of 23.7×15.6 mm².

A glass diffuser was situated in the optical path and the camera was focused on it. To perform a spatial analysis of the diffraction pattern, the diffuser was removed and replaced by a ruler to obtain the calibration factor that transforms pixels (in the focal plane of the camera) into distances (in the plane of the diffuser).

To avoid vibrations the camera was connected to a computer via the USB port, and pictures were taken with a keyboard command without touching the camera. The lens aperture and focusing were manually operated, and the rest of the process was controlled via Nikon capture software. The exposure time can be set automatically or manually for a given aperture. The computer was also used for visualizing, storing, and analyzing the images.

III. EXPERIMENTAL PROCEDURE

To develop a methodology for image capturing, the non-uniformity of the intensity distribution in diffraction patterns must be taken into account. Typically a bright central maximum accompanied by secondary maxima that are several orders of magnitude less intense can be observed. This dramatic intensity difference causes problems because for a given aperture of the camera and exposure time, there will be areas in the digital image where the pixel signals reach the saturation level while other areas remain hardly visible.

The proposed method to overcome this problem without losses of information consists in recording images at different exposure times (see Fig. 2). Pictures corresponding to the lower exposure give information about the intense central

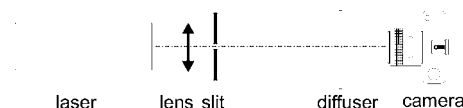


Fig. 1. Experimental setup to obtain digital images of the diffraction patterns.

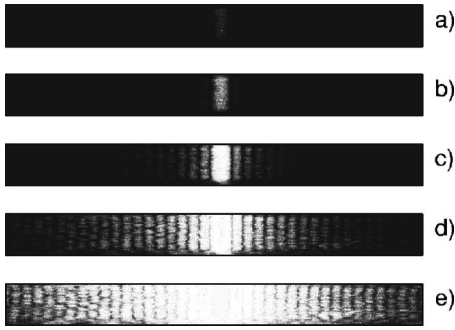


Fig. 2. Images of single slit diffraction patterns taken at increasing exposure times: (a) 1/4000, (b) 1/250, (c) 1/15, (d) 1, and (e) 15 s.

area. By increasing the exposure time information of the secondary maxima, can be obtained, although saturation might be reached in the central area. These pictures can be combined pixel by pixel to acquire a complete image of the diffraction pattern.

First, pictures must be converted to 8 bit grayscale, that is, 256 levels. Then, the combination of the series of images (I_k ; $k=0, \dots, n-1$) with increasing exposure times t_k in a nonsaturated new image I_0 can be performed as follows:

1. The first picture is considered as the initial image I_0 . This image should not be saturated and has the shortest exposure time, t_0 .
2. In the image I_k , nonsaturated pixels (gray level lower than 90% of the maximum value, 255) are located.
3. The nonsaturated pixels, NS , are used to replace the values in I_0 . To take into account the different exposure times in image I_0 and image I_k , a correction factor t_0/t_k was introduced so that $I_0(NS) = I_k(NS)t_0/t_k$.
4. Steps 2 and 3 are repeated for k from 1 to $n-1$.

The resultant image contains the intensity of each pixel corresponding to the picture with higher exposure without saturation.

To facilitate the task, a software package was written using MATLAB.²¹ In brief, the software reads the image files, shows the image on the screen, plots the intensity profiles at the center of the image, and shows the location of the saturated pixels (a nonsaturated image for each case is necessary). The user has only to select the image files to be combined. Time exposure, F number, and other characteristics, are obtained directly from the JPEG image files.

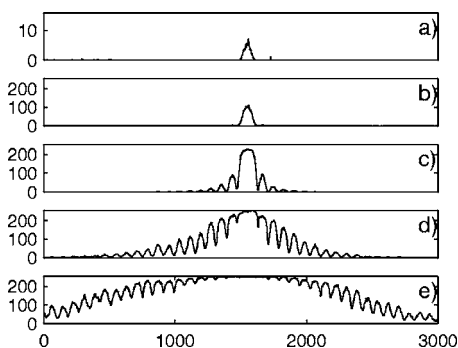


Fig. 3. Intensity profiles obtained as the average column values of the images at exposure times (a) 1/4000, (b) 1/250, (c) 1/15, (d) 1, and (e) 15 s.

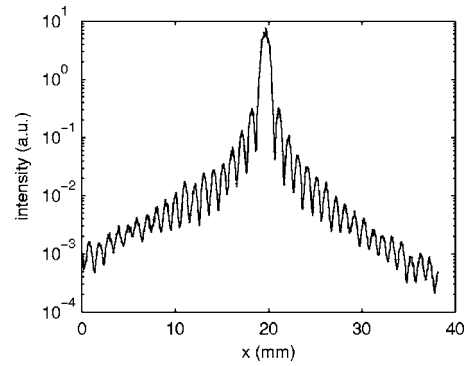


Fig. 4. Plot of the resulting intensity profile of the single slit diffraction pattern. The pixel number has been converted to millimeters.

IV. ANALYSIS OF DIFFRACTION PATTERNS

Measurements for single slits, double slits, and circular holes were recorded and the intensity profiles were analyzed by fitting experimental values to theoretical curves for Fraunhofer approximation.²⁰

A. Single slit

A single-slit diffraction pattern at exposure times of 1/4000; 1/250, 1/15, 1, and 15 s are shown in Fig. 2. The visible areas of the pattern increase with exposure time and saturation becomes appreciable.

A digital image consists of an array of pixel intensities distributed in rows and columns. In Fig. 3 the intensity profiles calculated as the average column values in the digital images are plotted. The saturation threshold corresponds to 90% of the maximum value, 255. In Fig. 3(a), corresponding to the lowest exposure time, all the pixels are less than the saturation level; increasing the exposure to 1/250 s causes only the central maximum to be visible but some pixels are saturated [Fig. 3(b)]; for 1/15 s the first three secondary fringes of the diffraction pattern can be observed but the central maximum is clearly saturated [see Fig. 3(c)].

The exposure times that have been selected give a intensity ratio of around 16 between two consecutive images. Therefore, each additional image increases the intensity range from the previous one by 4 bits. In Fig. 4 the resulting intensity profile, converted from pixel number to position, is shown. Note that the intensity range covers more than 4 orders of magnitude, which corresponds to more than 15 bits.

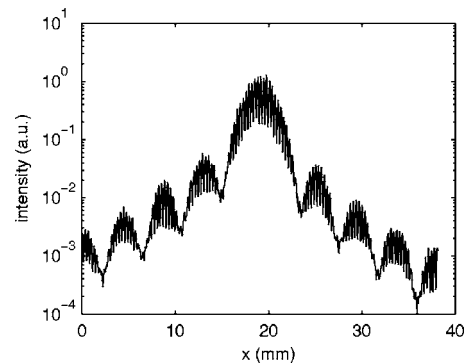


Fig. 5. Plot of the resulting intensity profile of the double slit diffraction pattern.

Table I. Values of the slit width b and results from the fit.

Supplier		Results from Fit		
b (μm)	b (μm)	σ_b (μm)	R^2	
160	155.8	0.8	0.9861	
80	85.7	0.4	0.9834	
40	40.76	0.16	0.9901	
20	20.48	0.09	0.9861	

The values of the intensity were fitted to the Fraunhofer equation for a slit width b :

$$I(\theta) = I(0) \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2}, \quad (1)$$

where $\beta = kpb/2$, $k = 2\pi/\lambda$, $p = \sin \theta = (x - x_0)/\sqrt{(x - x_0)^2 + L^2}$, x is the position in the picture normal to the slit, x_0 is the center of the diffraction pattern, and L is the distance from the slit to the screen (diffuser). A nonlinear least squares fit of $I(x)$ using the known values of L and λ is used to estimate b and x_0 and their confidence bounds. The slit width uncertainty σ_b is obtained as one half of the interval for a 95% confidence level. The experimental values of b for different slits are summarized in Table I. These results confirm the quality of the method.

B. Double slit

By following the same procedure a complete diffraction pattern produced by a double slit arrangement was recorded; the intensity values are plotted in Fig. 5. The pattern consists of a set of narrow, equally spaced fringes superimposed on the single-slit diffraction intensity envelope.

The intensity corresponding to a double slit of width b and distance between centers a is given by

$$I(\theta) = I(0) \frac{\sin^2 \beta}{\beta^2} \cos^2 \alpha, \quad (2)$$

where $\alpha = kpa/2$. The interference term, $\cos^2 \alpha$, multiplies the diffraction pattern of a single slit given by Eq. (1). Different values of a and b were tried, and the results are summarized in Table II. As before, the calculated values are in agreement with the value given by the manufacturer.

C. Circular hole

Due to the radial symmetry of the pattern, the procedure to obtain the intensity distribution must be slightly different.

Table II. Supplier and experimental values obtained for the double slit arrangement.

Supplier		Results from Fit				
a (μm)	b (μm)	a (μm)	σ_a (μm)	b (μm)	σ_b (μm)	R^2
500	40	508.2	0.3	38.0	0.4	0.9366
250	40	248.4	0.2	36.7	0.2	0.9757
125	40	128.4	0.2	43.0	0.2	0.9823
250	80	248.9	0.3	78.5	0.3	0.9909
500	80	502.0	0.9	71.2	1.0	0.8816

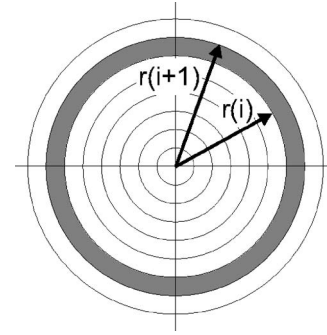


Fig. 6. Slices to calculate the intensity distribution for diffraction by a circular hole.

First, the coordinates of the geometric center of the image were calculated by fitting the first minimum to the equation for the circumference. Then, the pattern was cut into 100 circular slices (see Fig. 6). For a given radius, the intensity was calculated as the sum of the pixel intensities in the slice between $r(i)$ and $r(i+1)$. The resulting intensity values, plotted in Fig. 7, were fitted to the relation

$$I(\theta) = I(0) \left[\frac{J_1(kpw)}{kpw} \right]^2, \quad (3)$$

where $k = 2\pi/\lambda$, $p = \sin \theta = r/\sqrt{r^2 + L^2}$, $w = D/2$ is the radius of the hole, and $J_1(x)$ is the Bessel function of the first kind.

In this experiment the diameter of the hole was $D = 80 \mu\text{m}$. The experimental values of D , calculated at different distances L , are shown in Table III as “fit 1.” The experimental values are far from the correct ones. This discrepancy can be attributed to the great difference between the intensity in the central maximum and the rest of the diffraction pattern, which leads to the points in the central maximum having a much higher weight in the fit than points outside the maximum.

The best results are obtained using the position of the minima of the diffraction pattern, x_n . These values were calculated by means of a cubic spline interpolation function for the intensity profile. The zeroes of the first derivative when the second derivative is positive give the position of the minima. By fitting these minima to the zeroes of $J_1(x)$ ($x = 3.831705970, 7.015586670, 10.17346814, \dots$), the slope provides a new and more realistic estimate of the hole diameter, summarized in Table III as “fit 2.”

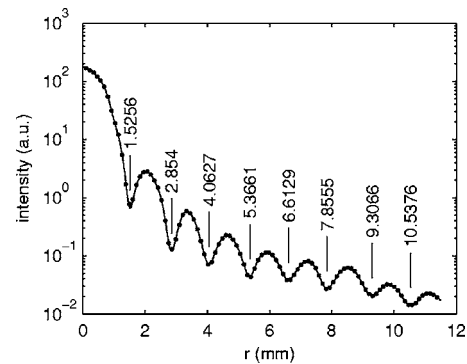


Fig. 7. Plot of the intensity profile of the circular hole diffraction pattern. The numbers inside the plot indicate the radius of the minima.

Table III. Experimental values of the hole diameter D at different distances L , obtained by fitting the intensity profile to the Fraunhofer equation (fit 1), and by fitting the minima of the diffraction pattern to the zeroes of $J_1(x)$ (fit 2).

Distance L (cm)	Fit 1			Fit 2		
	D (μm)	σ_D (μm)	R^2	D (μm)	σ_D (μm)	R^2
50	72.8	0.8	0.9783	72.1	1.4	0.999998
25	68.3	0.6	0.9984	72.7	1.2	0.999919
15	68.2	0.5	0.9991	76	2	0.999292

V. SUMMARY

We have reported on a simple method based on the use of a digital photo camera and computer image processing to perform quantitative experiments in Fraunhofer diffraction. This methodology lets us obtain reliable quantitative data, avoiding the use of filters, which diminish the intensity and cause the loss of information about the diffraction pattern.

By employing this methodology students can quickly and routinely record diffraction patterns. Simple calibrations allow them to convert pixel numbers to position to a high degree of accuracy. This technique can also be used for other photometric applications.

^{a)}Electronic mail: aramil@cdf.udc.es

¹A. G. Podoleanu, S. R. Taplin, D. J. Webb, and D. A. Jackson, "Channelled spectrum display using a CCD array for student laboratory demonstrations," *Eur. J. Phys.* **15**, 266–271 (1994).

²K. H. Elliott and C. A. Mayhew, "The use of commercial CCD cameras as linear detectors in the physics undergraduate teaching laboratory," *Eur. J. Phys.* **19**, 107–117 (1998).

³M. P. Silverman and W. Strange, "The Newton two-knife experiment: Intricacies of wedge diffraction," *Am. J. Phys.* **64**, 773–787 (1996).

⁴G. R. Wein, "A video technique for the quantitative analysis of the poiss-

son spot and other diffraction patterns," *Am. J. Phys.* **67**, 236–240 (1999).

⁵C. Lengacher, S. Macklin, D. Hite, and M. F. Masters, "Low cost CCD detectors for spectroscopy," *Am. J. Phys.* **66**, 1025–1028 (1998).

⁶C. de Izarra and O. Vallee, "On the use of linear CCD image sensors in optics experiments," *Am. J. Phys.* **73**, 986–990 (2005).

⁷O. Van Overschelde and M. Wautelet, "Self-diffraction in a CCD camera," *Eur. J. Phys.* **26**, 15–17 (2005).

⁸S. Gil, H. D. Reisin, and E. E. Rodriguez, "Using a digital camera as a measuring device," *Am. J. Phys.* **74**, 768–775 (2006).

⁹N. A. Gross, M. Hersek, and A. Bansil, "Visualizing infrared phenomena with a webcam," *Am. J. Phys.* **73**, 986–990 (2005).

¹⁰P. Nakroshis, M. Amoroso, J. Legere, and C. Smith, "Measuring Boltzmann's constant using video microscopy of Brownian motion," *Am. J. Phys.* **71**, 568–573 (2003).

¹¹J. Peatross and M. V. Pack, "Visual introduction to Gaussian beams using a single lens as an interferometer," *Am. J. Phys.* **69**, 1169–1172 (2001).

¹²L. Repetto, F. Pellistri, E. Piano, and C. Pontiggia, "Gabor's hologram in a modern perspective," *Am. J. Phys.* **72**, 964–967 (2004).

¹³M. Vannoni and G. Molesini, "Speckle interferometry experiments with a digital photocalera," *Am. J. Phys.* **72**, 906–909 (2004).

¹⁴R. Cross, "Measurements of the horizontal coefficient of restitution for a superball and a tennis ball," *Am. J. Phys.* **70**, 482–489 (2002).

¹⁵T. Greczylo and E. Debowska, "Using a digital video camera to examine coupled oscillations," *Eur. J. Phys.* **23**, 441–447 (2002).

¹⁶J. A. Monsoriu, M. H. Gimenez, J. Riera, and A. Vidaurre, "Measuring coupled oscillations using an automated video analysis technique based on image recognition," *Eur. J. Phys.* **26**, 1149–1155 (2005).

¹⁷M. E. Saleta, D. Tobia, and S. Gil, "Experimental study of Bernoulli's equation with losses," *Am. J. Phys.* **73**, 598–602 (2005).

¹⁸K. J. Silva and J. C. Mahendra, "Digital video microscopy in the Milikan oil-drop experiment," *Am. J. Phys.* **73**, 789–792 (2005).

¹⁹B. T. King and W. Tobin, "Charge-coupled device detection of two-beam interference with partially coherent light," *Am. J. Phys.* **62**, 133–137 (1994).

²⁰Max Born and Emil Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 6th ed. (Pergamon, Oxford, 1980).

²¹See EPAPS Document No. E-AJPIAS-75-012710 for the software written for MATLAB and example images. This document can be retrieved through a direct link in the online article's HTML reference section or via the EPAPS homepage (<http://www.aip.org/pubservs/epaps.html>).

Focos				
Horario	FOCO ENERGÍA	FOCO ILUMINACIÓN	FOCO ELECTRÓNICA	FOCO SEGURIDAD ELÉCTRICA Y BAJA TENSIÓN
2007				
Miércoles 07. 11	Matriz Energética	Novedades Tecnológicas	Edificios Inteligentes	Eficiencia y Seguridad de Productos Eléctricos
09 - 10 hs.	<p>C5</p> <p>"Energía Eólica: Evolución de Estrategias para la Incorporación a la Matriz Mnergética." . GIUMELLI, Laura AAEE</p>	<p>C25</p> <p>"Aplicación de la interferometría holográfica a materiales tratados con láser de potencia. Corte de partes E de núcleos de equipos auxiliares para iluminación " . VINCITORIO, Fabio M. U.T.N. - Regional Paraná</p>	<p>C45</p> <p>"Edificios Inteligentes" PUYOL, Orlando Herminio COPITEC y UTN Buenos Aires</p>	<p>C65</p> <p>Trabajo Premiado Concurso BIEL light+building 2007 "Instalaciones Eléctricas para Uso Hospitalario" SOLER, Carlos Oscar</p>
10 - 11 hs.	<p>C6</p> <p>"Energía Nuclear: estado actual en el mundo y perspectivas en Argentina" REY, Francisco Carlos C.N.E.A.</p>	<p>C26</p> <p>"Tecnologías actuales para la iluminación eficaz" ALLEGUE, Hugo M. A.A.D.L.</p>	<p>C46</p> <p>"Introducción al diseño y estrategias operativas" MARCO, Ricardo</p>	<p>C66</p> <p>"Normalización, Ensayos y Certificación de Eficiencia Energética en Lámparas Eléctricas de Uso General" PAISAN, Pablo / PETRONI, Osvaldo D. IRAM</p>
11 - 12 hs.	<p>C7</p> <p>MESA REDONDA: Matriz energética Argentina: sustentabilidad económica y ambiental; Escenarios y desafíos. TANIDES, Carlos Gustavo / RABINOVICH, Gerardo / CEBREIRO, Mario / BOUILLE, Daniel</p>	<p>C27</p> <p>"LED´s, la frontera de la innovación" WALENTOWSKI, Thomas OSRAM / Alemania</p>	<p>C47</p> <p>"Control de la Energía en Edificios Inteligentes" ESPINOSA, Eduardo SCHNEIDER/ Director TAC Latin American Partners / México.</p>	<p>C67</p> <p>"25 años de experiencia en la realización de mediciones y ensayos de control de calidad de equipamiento para instalaciones eléctricas de media y baja tensión " ARROJO, Carlos Darío DÍAS, Ricardo U.N.L.P. / L.E.M.E</p>
12 - 13 hs.		<p>C28</p> <p>"Evolución y Tendencias en el Desarrollo de Balastos Electrónicos" SAUQUILLO, Enrique ELB / España</p>	<p>C48</p> <p>"El dominio de la luz" DREIER, Thomas OSRAM / Alemania</p>	<p>C68</p> <p>"Centro Electrotécnico de Investigación y Ensayos" ETCHEVERRY, Alberto Rubén NORDIO, Héctor Hugo Energía Argentina S.A. ENARSA</p>

APLICACIÓN DEL LÁSER DE POTENCIA Y LA INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA AL CORTE Y ESTUDIO DE PARTES *E* DE NÚCLEOS DE BALASTOS PARA EQUIPOS AUXILIARES DE ILUMINACIÓN.

**Autores: Universidad de La Coruña, Departamento de Ingeniería Industrial II
Dr. Armando Yáñez Casal**

**Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Paraná, Física.
Ing. Fabio Vincitorio**

**Domicilio: Universidad de La Coruña, Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Industrial II
Rúa Mendizábal S/N Esteriro CP 15403 - Ferrol - España.
e-mail: ayanez@udc.es**

**Universidad Tecnológica Facultad Regional Paraná
Almafuerte 1033 CP 3100 - Paraná (ER) Argentina
e-mail: fisica@frp.edu.ar**

Foco tecnológico: Iluminación.

Resumen.

En este trabajo se presenta un estudio orientado a obtener mediante corte con láser de potencia las partes *E* de los núcleos de balastos y su comparación con técnicas más convencionales de fabricación tales como la prensa de corte rápido. El análisis de las piezas obtenidas por ambas técnicas se realiza en dos direcciones, de una parte una caracterización metalúrgica donde se busca la aparición de fases que tienen que ver con el comportamiento magnético del material pudiendo dar lugar a una mayor o menor cantidad de pérdidas dependiendo de la distribución de esas fases. Por otro lado se utiliza la técnica denominada interferometría holográfica de doble exposición, para encontrar las deformaciones mecánicas debidas a las variaciones térmicas o magnéticas en los núcleos de balasto.

1. Introducción.-

El funcionamiento del láser se basa en una parte muy importante en el concepto formulado por A. Einstein a principios del s. XX de la emisión estimulada. Este mecanismo permite la obtención de fotones idénticos que son los que luego conforman la luz láser y le confieren todas sus propiedades, así todos viajan en la misma dirección, todos tienen la misma longitud de onda, todos son emitidos en fase. De esta coincidencia surgen las tres propiedades esenciales del láser que son la direccionalidad, la monocromaticidad y la coherencia.

Estas tres propiedades son las que permiten que la radiación láser tenga un número tan elevado de aplicaciones. Cada tipo de aplicación requiere de una serie de características exigibles a la fuente láser a utilizar en cada ocasión. Así las aplicaciones industriales de corte, soldadura y tratamiento térmico superficial requieren de sistemas láser de potencia como son los CO₂ y los Nd:YAG continuos montados sobre mesas de coordenadas manipuladas por Código de Control Numérico o sobre brazos robotizados, como ocurre en el CO₂ (a) y Nd:YAG (b) de la fig. 1. Las aplicaciones ópticas requieren también de sistemas continuos o pulsados pero de menor potencia que emitan en una longitud de onda visible, otras aplicaciones como las químicas o las medioambientales requieren de un láser pulsado que induzca la excitación del material para poder recoger la señal correspondiente a la relajación y así obtener los espectros de emisión (fig 2).



Figura 1.- Sistema láser de CO₂ y mesa de coordenadas (izquierda), láser de Nd:YAG con cabezal sobre brazo robotizado.

La industria del corte por láser está dominada por el perfilado de láminas de acero de tanto inoxidables como de bajo contenido en carbono. El proceso de corte se alcanza por una combinación de calentamiento con láser y reacción química del hierro con el oxígeno. La reacción de oxidación es exotérmica y actúa como una segunda fuente de energía que ayuda a acelerar el proceso de corte. Básicamente, el acero se calienta localmente por el haz láser focalizado, hasta una temperatura en la que hierro reacciona con el chorro de oxígeno que actúa coaxialmente con el haz. El acero inoxidable se corta de una manera menos efectiva debido a la presencia de óxidos de cromo en las zonas de corte que tienden a apantallar la fusión que produce el chorro de gas incidente. Por ello los mecanismos son diferentes y en lo que sigue se hará una pequeña discusión sobre ellos.

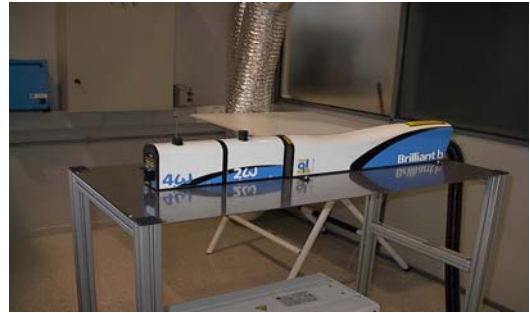
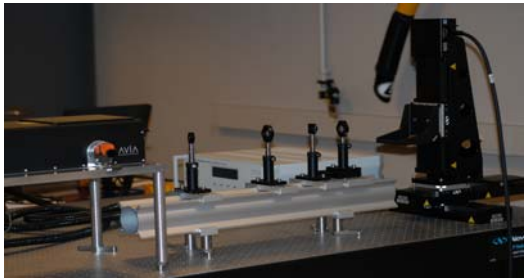


Figura 2.- Sistema láser de Nd:YVO4 para procesos de micromecanizado, láser pulsado de Nd:YAG con opción de multiplicación en frecuencia

En el corte por láser los materiales sufren daños físicos y/o químicos sobre una zona estrecha. En el caso de aceros de bajo contenido en carbono el efecto de la reacción química durante el corte es particularmente importante. La reacción química, la oxidación del acero, aumenta la velocidad de corte y la calidad de acuerdo con el corte por fusión no sin ciertos inconvenientes entre los que destaca el sobrecalentamiento local.

2. Corte de aceros.-

El proceso de corte de aceros con bajo contenido en carbono tiene una ventana de operación amplia dentro de la cual es posible obtener cortes de buena calidad. Los problemas aparecen cuando se quieren alcanzar velocidades de corte elevadas. Lo que se suele hacer en estos casos es determinar esa máxima velocidad de corte y trabajar a velocidades menores en un 10 ó 20% menores. Esta práctica asegura que la máquina de corte trabaja bien dentro de estos límites y queda por lo tanto insensible a cambios menores en otros parámetros del proceso.

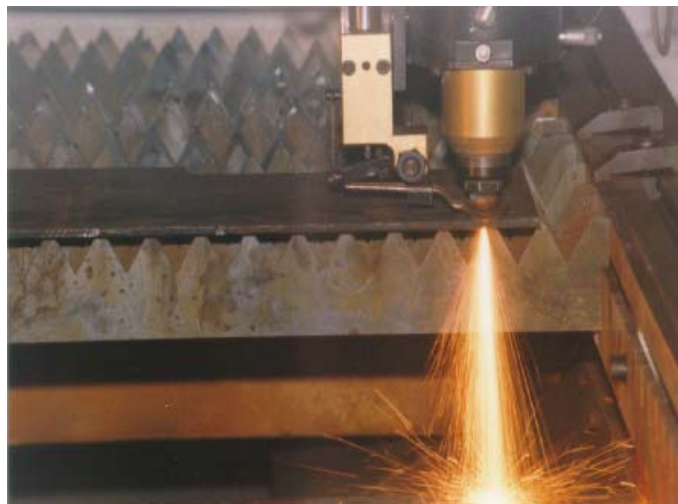


Figura 3.- Proceso de corte de una pieza de acero. Se aprecia como el chorro de gas elimina el material fundido

La flexibilidad del proceso de corte permite, si se trabaja a las velocidades sugeridas en el apartado anterior, se permiten incertidumbres se resumen en la tabla siguiente.

Potencia	30% por encima y 10% por debajo sin afectar seriamente al proceso.
Posición del foco	Puede tenerse una incertidumbre del 1% en la distancia focal.
Estado superficial	Áreas locales de corrosión superficial o pequeñas variaciones de espesor no afectan a la calidad del corte.
Gas de proceso	Se admiten oscilaciones en el flujo de oxígeno del 10% sobre su valor óptimo. Sin embargo las oscilaciones permitidas en la pureza del gas son más estrechas: el 1% de variación en el flujo hace que la velocidad de corte óptima se modifique hasta un 30%.

A partir de aquí se puede decir que el corte por láser de aceros de bajo contenido en carbono es fiable si se presta atención a los parámetros citados, de acuerdo con el procedimiento establecido en el párrafo anterior.

Al hierro se le añaden elementos aleantes para conseguir materiales con una variedad de propiedades. Las propiedades que se requieren son: dureza, tenacidad, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste y características magnéticas específicas. Las aleaciones de hierro se han desarrollado para satisfacer cada uno de estos requisitos individualmente y en varias combinaciones. Por ejemplo, si se añade una mayor proporción de carbono (hasta un 1%) y se efectúa el ciclo térmico correspondiente se adquieren interesantes propiedades de dureza y resistencia al desgaste. Los aceros inoxidables llegan a tener elementos aleantes por encima del 30%. Los distintos elementos aleantes y su concentración tienen efectos diferentes en el proceso de corte por láser. Trataremos los aceros inoxidables y los aceros con silicio.

Los aceros inoxidables fueron desarrollados para resistir la corrosión. La presencia de cromo es el principal elemento frente a la resistencia a la corrosión y a la vez es el material que más en actúa en contra de la eficiencia del proceso de corte. El óxido de cromo es una barrera que impermeabiliza al material. Todos los aceros inoxidables contienen más de un 10% de cromo y otros elementos aleantes. Hay cuatro tipos de aceros inoxidables que son los austeníticos, los ferríticos los duplex y los martensíticos.

Aceros Inoxidables austeníticos: Este es el grupo más importante de aceros de la familia de los inoxidables y son los más utilizados en el proceso de corte por láser. Poseen una alta resistencia a la corrosión y al desgaste. Contienen un 18% de Cr y un 8% (10%) de Níquel.

Aceros inoxidables ferríticos: Contienen 17 ó 20% de cromo pero sin otros elementos aleantes. Tienen una pobre soldabilidad y no son útiles para aplicaciones a bajas temperaturas. Su resistencia a la corrosión es inferior a los aceros austeníticos, pero gracias a que son menos aleados su precio es más bajo.

Aceros dúplex: Tienen una composición y estructura intermedia entre los ferríticos y los austeníticos. Son más tenaces que los austeníticos y tienen una resistencia a la corrosión superior que la de los aceros ferríticos.

Aceros inoxidables martensíticos: Difieren de los otros en que pueden ser endurecidos si se les aplica el tratamiento térmico adecuado. Su dureza duplica a los ferríticos y austeníticos. Tienen un contenido en cromo más bajo. El carbono está presente en mayores cantidades que en los otros dos tipos. Tienen ventajas en cuanto a dureza pero tienen peor soldabilidad y resistencia a la corrosión que los anteriores.

El mecanismo de corte de los aceros inoxidables es prácticamente el mismo que el caso de los aceros de bajo contenido en carbono. La diferencia está en que el proceso de oxidación que contribuye a proporcionar más energía al proceso no es tan eficiente en el caso del acero inoxidable. Las razones están en que el óxido de cromo actúa como barrera para la penetración del calor, el chorro de gas arranca esta capa lo que permite el flujo de calor hacia el interior del material. Asimismo la tensión superficial del óxido de cromo es mayor que la del óxido de hierro que se produce en el corte de aceros de bajo contenido en carbono.

3. Aceros con contenido en Si.-

La adición de una pequeña cantidad de silicio (4%) al acero mejora sus propiedades en aplicaciones eléctricas tales como transformadores o motores. El silicio colabora en la reducción de las corrientes parásitas gracias a que eleva la resistividad por un factor cuatro. Otro de los efectos que produce el silicio es la resistencia a la oxidación a alta temperatura. No sorprende, entonces que el silicio tenga un efecto negativo en el proceso de corte (comparado con los aceros poco aleados y de bajo contenido en carbono) lo que da lugar a bajas velocidades de corte junto con cierta rebaba. Las razones por las cuales ocurre esto no están del todo claras, pero aparentemente la tensión superficial aumenta en la zona cortada lo que de alguna manera frustra la siempre deseada oxidación del hierro. Una posible razón para esto es el hecho de que el dióxido de silicio y el óxido de silicio que se forman durante el corte tienen densidades mucho menores que los óxidos de hierro. Es probable que estos óxidos de silicio formen una capa superficial en la zona fundida que afecta a la tensión superficial y a la cinética de la oxidación. Tal y como se muestra en la fig. 4. La presencia de este efecto no es deseable en absoluto, a veces puede evitarse utilizando un haz pulsado o chorros de gas auxiliares.

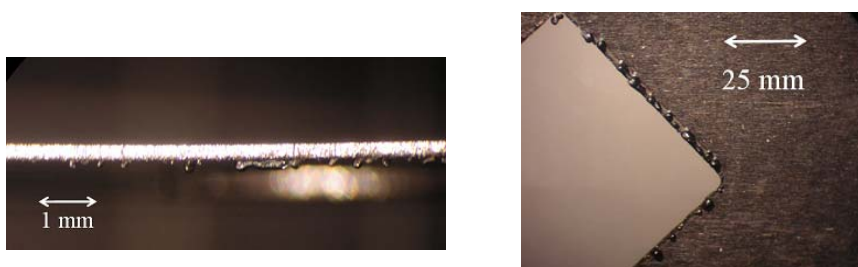


Figura 4.- Piezas de acero con contenido en Si cortadas con láser, se aprecian las rebabas no deseadas.

4. Resultados de las pruebas realizadas.-

De acuerdo con lo indicado en los párrafos anteriores la presencia de Si en los aceros hace que la reacción de oxidación no sea todo lo eficiente que se desea apareciendo también una zona de rebaba en la parte inferior de los perfiles cortados. Por lo tanto se tomó como gas de proceso el nitrógeno lo que quiere decir que las pruebas fueron realizadas en atmósfera inerte sobre unas piezas de acero con Si de 0.5 mm de espesor. Se situó el foco en la superficie y se ensayaron dos potencias 770 W y 660 W. La velocidad de desplazamiento haz-pieza se tomó como de 2 m/min. Los resultados obtenidos fueron evaluados y comparados con los que se obtienen mediante el proceso de corte tradicional. En la evaluación se presentan además de los perfiles de corte las microdurezas obtenidas.

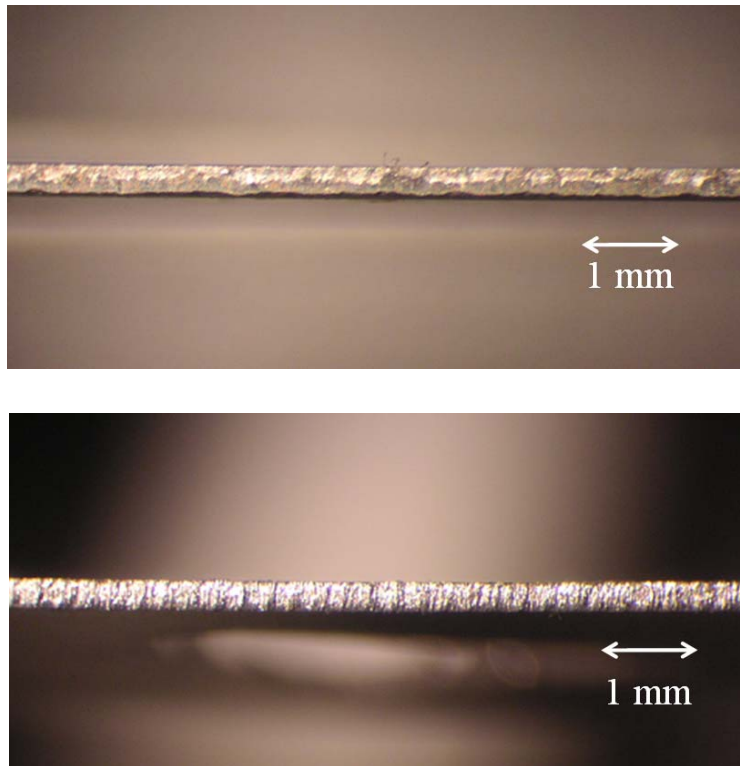


Figura 5.- Detalle de secciones cortadas, arriba la cortada con prensa , abajo la cortada con láser.

La calidad del perfil de corte obtenido es prácticamente equivalente, fig. 5, la ausencia de rebaba en la cortada con láser gracias a la utilización de nitrógeno facilita que las piezas puedan ser utilizadas en la construcción de transformadores pues pueden ser apilables, una de las exigencias fundamentales.

En cuanto a las microdurezas alcanzadas cabe destacar que al tratada con láser ofrece una microdureza más homogénea. Si se realiza un corte transversal se ve que la pieza que ha sido cortada con cizalla en los puntos más próximos al borde se tiene un punto singularmente duro 245 HV frente a los 184 HV que se obtienen en el caso del láser. Por lo tanto la estructura es más homogénea si la pieza se corta con láser, lo que puede beneficiar la estabilidad térmica del conjunto que conformará el transformador. Lo que se adivina en el perfil de la pieza cortada con láser es el clásico perfil estriado, este

perfil indica que a pesar de que el proceso es continuo tanto desde el punto de vista de la energía emitida por el láser como en la velocidad de desplazamiento, el proceso se comporta de manera cíclica o periódica.

Por otro lado la velocidad de recorrido del láser sobre la pieza permite establecer que el ritmo de producción de piezas puede estar entre las cuatro y cinco por minuto. Bajo si se compara con el obtenido en el procedimiento tradicional pero que permite la fabricación de pequeñas series o ensayos de nuevas configuraciones sin el elevado gasto que a veces supone la fabricación de los propios troqueles.

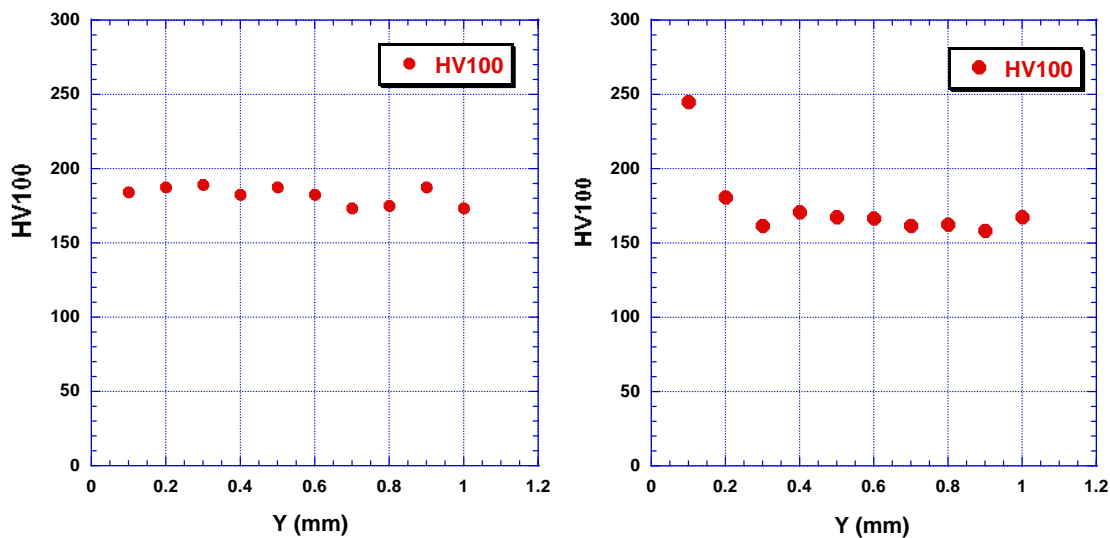


Figura 6.- Microdurezas de una sección del corte: a la izquierda la pieza cortada con láser. A la derecha la cortada en prensa de corte rápido.

5. Análisis de las piezas cortadas mediante interferometría holográfica.-

Procedimiento experimental

La técnica holográfica denominada interferometría holográfica de doble exposición, por variación térmica de la pieza fue la técnica utilizada en el estudio que se detalla a continuación. En ésta una superposición de dos hologramas de un mismo objeto son almacenados sobre el medio de registro, las imágenes resultantes de cada uno de los hologramas se diferencian entre si por el hecho de haberse producido cambios en los patrones de interferencia que dan origen a las mismas. Estos cambios provienen de las variaciones dimensionales de la pieza u objeto bajo estudio al haberles producido una variación de su temperatura lo que conlleva a un cambio en sus dimensiones por dilatación. El proceso se basa en calentar la pieza hasta una temperatura superior a los 100° C y posteriormente dejarla enfriar por convección natural. Un primer holograma suele tomarse cuando la temperatura, registrada sobre un punto particular de esta, se encuentra entre los 45 ° y los 35 ° C. Posteriormente con un intervalo de temperaturas no

superior a lo 5 ° C se realiza una segunda exposición. El resultado final del proceso es la observación de franjas claras y oscuras que se superponen a la imagen holográfica del cuerpo bajo estudio. Básicamente las franjas muestran una suerte de mapa del comportamiento dinámico de la pieza durante el proceso de contracción, el cual es dependiente de las características de la pieza, incluyendo tensiones residuales que pudieran haberse originado durante el proceso de fabricación a consecuencia de la presión ejercida por las herramientas de corte.

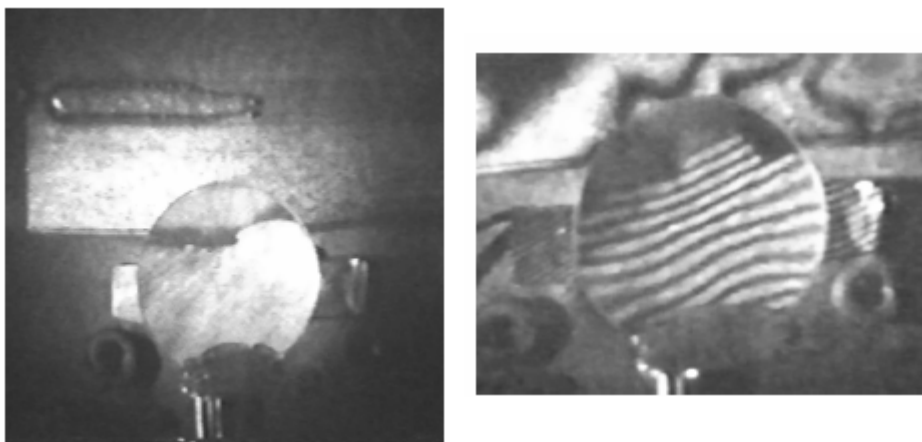


Figura 7.- Fotografías de dos hologramas de la misma pieza. A la derecha se muestra un holograma simple, a la izquierda un holograma de doble exposición interferométrico.

Cada franja representa la zona de igual cambio en la longitud del camino óptico entre ambos hologramas, el cual depende en forma directa del cambio dimensional del objeto bajo estudio. Básicamente en la zona sobre la cual observamos un cambio de una franja clara a oscura, podemos hablar de un cambio en la diferencia del camino óptico proporcional a la deformación sufrida por el cuerpo equivalente a media longitud de onda de la fuente de luz utilizada. En este caso un láser de He-Ne cuya longitud de onda es de 632,8 nm.

Cuando se desea realizar un análisis cualitativo de la información aportada por el ensayo, la simple observación de la imagen suele ser suficiente. Con la ayuda de un sistema de adquisición de imágenes el estudio puede ser realizado directamente sobre un PC. Por el contrario cuando el análisis necesita aportar información cuantitativa, deben ser realizadas compensaciones en función de los ángulos de observación e iluminación respecto del objeto y su sentido de deformación. En el caso particular de éste trabajo solo interesa controlar los cambios cualitativamente ya que la información buscada guarda relación con la dirección de los esfuerzos a los que queda sometida la pieza mas que con la magnitud, la cual se encuentra directamente asociada al coeficiente de dilatación del material constitutivo de la pieza. Ciertas limitaciones deben tenerse en cuenta a la hora de aplicar este método, en particular la interferometría de doble exposición no aporta información respecto del comportamiento de la pieza en la etapa intermedia entre el estado inicial y el final, por otra parte no es posible definir en forma directa, sin complicar la técnica de realización, el sentido relativo de la deformación. Cuando la pieza es sometida a un proceso térmico se pierde la posibilidad de seleccionar un sentido particular de deformación, por lo cual se sacrifica la selectividad espacial. De

todas formas al estudiar núcleos de transformador cuyo espesor es mínimo respecto de sus otras dimensiones podemos considerar prácticamente deformaciones bidimensionales, salvo en aquellos casos donde la pieza tienda a torcerse en el sentido perpendicular al plano principal.

Resultados experimentales

Para mostrar las capacidades de la técnica propuesta se han realizado dos hologramas sobre una de las muestras disponibles.

El primero de ellos fue realizado sobre la base de un intervalo de temperaturas de 5 °C, con temperatura inicial de 30 °C y temperatura final de 25 °C. La fig. 8 muestra la imagen registrada fotográficamente del holograma cuando su ángulo de observación es perpendicular al plano del cuerpo y de la placa en ambas direcciones. Las franjas se observan cercanas unas de otras indicando una dilatación importante en relación a la longitud de onda de la luz. La zona (3) muestra claramente éste efecto. La zona (2) aparece como una zona en la cual casi no se ha producido deformación de la pieza comparativamente con el área cercana, este punto puede estar originando parte del cambio del comportamiento dinámico del cuerpo. La zona (1) es de particular interés ya que este tipo de patrones suele estar relacionado con la existencia de un desplazamiento fuera del plano del objeto. Si consideramos a éste en el plano Oxy indicaría un movimiento en el sentido del eje z . La técnica utilizada no permite definir el sentido relativo de la deformación.

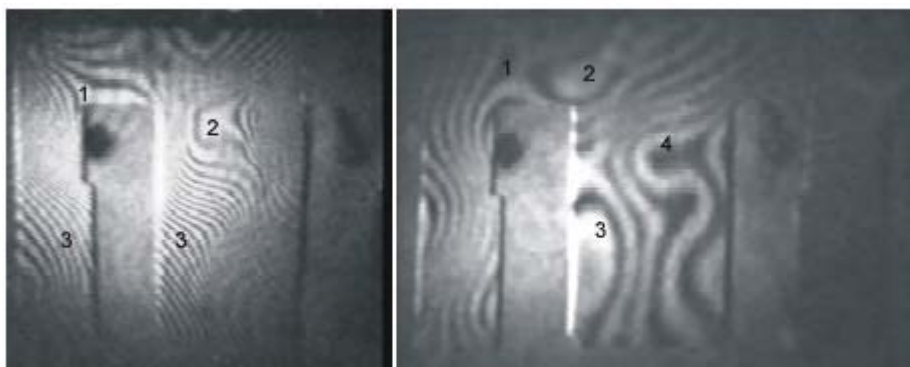


Figura 8.- Fotografías de dos hologramas de la misma pieza. A la izquierda se presenta el realizado perpendicularmente al plano de la pieza, a la derecha

La figura 8 muestra la imagen presentada por misma muestra cuando el intervalo de temperatura es de 2 °C y el ángulo de observación es en dirección perpendicular al plano del objeto y placa (siendo ambos planos paralelos). Las franjas resultantes presentan diferencias con el holograma anterior. En la parte central del núcleo, las franjas muestran una separación mayor, en proporción con el lateral izquierdo, que en el caso anterior. Por otra parte existen zonas que pueden ser asociadas a puntos nodales, que indican un desplazamiento en el sentido de lo que hemos llamado eje z . Existen diferencias en la zona (1) de ambas figuras, que en un principio pueden ser consideradas contradictorias. El área (2) muestra un suerte de área cerrada sobre si misma. Existe cierta similitud en el comportamiento en centro del núcleo (2) y (4) de ambos

hologramas. La zona (3) muestra deformación menor que el resto de la pieza para este ángulo de observación. Los resultados obtenidos a partir de las fotografías precedentes muestran diferencias importantes en el comportamiento de la misma pieza. Sin embargo la observación de los hologramas con ángulos diferentes demuestra más puntos de coincidencia que diferencias. Para fundamentar el análisis siguiente debemos observar el comportamiento de una pieza, como lo es la presente en la fig. 7 con un desplazamiento en el plano y el comportamiento de un objeto cuando su deformación se produce en el sentido perpendicular al plano que la contiene. En el caso de la fig. 7 las franjas aparecen distribuidas horizontalmente mostrando una uniformidad en el sentido del desplazamiento de la pieza.

En la región (1) de la fig. 8 (izquierda) se aprecia una familia de hipérbolas que ya han sido caracterizadas en la literatura básica sobre la técnica. Estas representan, en la técnica de holografía en tiempo real, los modos de vibración a diferentes frecuencias. Si modificamos levemente las condiciones de holograma de la fig. 8 (derecha) de manera que cambiamos el ángulo de observación nos aparece la situación de la fig. 9

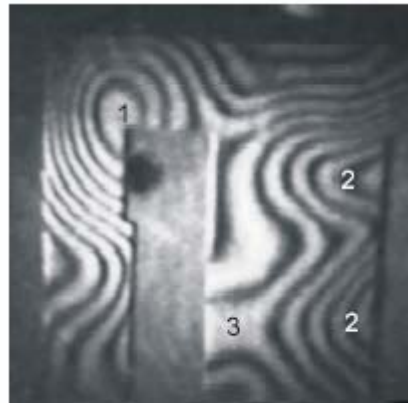


Figura 9.- Holograma tomado con un ángulo de 40° respecto a la perpendicular al plano de la pieza.

La zona 1 de ésta última figura muestra claramente un nodo que en este caso no puede representar una oscilación por haberse utilizado la técnica de doble exposición, por lo cual representa un desplazamiento en dirección perpendicular al plano del cuerpo sin poder definir si el sentido es hacia adelante o hacia atrás. A partir de esto queda claro que para producirse por dilatación un desplazamiento de la pieza en ésta dirección deben existir tensiones residuales sobre el material. Por otra parte la zona 3, que en la fig. 8 (izquierda) se mostraba como una curva cerrada se ha convertido en una distribución hiperbólica, lo cual nos estaría demostrando la existencia de un fenómeno similar al anteriormente mencionado. Las zonas (2) y en general el resto de la pieza muestran comportamientos similares, encontrándose uniformidad solo en la zona superior derecha.

Se ha realizado el mismo análisis sobre otras piezas cortadas en prensa y no se ha registrado el mismo comportamiento. Parece, en este momento del desarrollo del trabajo, difícil de precisar si las tensiones residuales aparecen en todas las piezas procesadas con prensa de corte rápido.

6. Resumen y conclusiones.-

Se han analizado, a diferentes niveles, piezas de acero cortadas por láser y por prensa de corte rápido. En una primera comparativa entre las piezas cortadas con láser y las de prensa vemos que las procesadas con láser son las que ofrecen un aspecto más homogéneo. Esta homogeneidad ha de ser desvelada con mayor profundidad utilizando otras técnicas de caracterización.

El análisis realizado sobre las muestras extraídas la línea de producción las cuales presentan comportamiento muy diverso en lo referente a la presencia y/o ausencia de tensiones residuales. Por lo tanto es algo que ha de ser desvelado de manera estadística.

Asimismo las piezas tratadas con láser deben ser sometidas a la misma técnica. Aquel proceso que de lugar a piezas que ofrezcan un mejor comportamiento térmico serán las más indicadas para la producción, dado que minimizarían los no deseables problemas de apilado del núcleo, entrehierros variables con la temperatura, emisiones sonoras de mayor magnitud y otros.

El presente trabajo se encuentra en proceso de desarrollo y deberá, tal como se mencionó anteriormente, encontrar la tendencia que establezca el comportamiento más común presente de las piezas fabricadas en la línea de montaje con la prensa de corte rápido y con láser .

7. Bibliografía.-

Para tener una referencia más completa de los diferentes aspectos aquí tratados se propone la lectura de los libros siguientes.

1. J. Powell. CO2 Laser Cutting. Springer Verlag (1993).
2. H.J. Caufield. Handbook of Optical holography . Academic Press (1979).
3. P. Hariharan. Optical holography principles, techniques and applications. Second edition P. Hariharan - Cambridge (1996).

Ensayos por interferometría holográfica de materiales tratados con láser de potencia.

F. Vincitorio, C. Freyre, J. Gervasoni, A. Cassano, M. Spector

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Paraná

Almafuerte 1033, Paraná 3100-Entre Ríos – Argentina.

Tel/Fax: 0054 343 4243054

fisica@frp.utn.edu.ar

A. Ramil Rego, A. J. López, A. Yáñez Casal, Gines Nicolás.

Universidad de La Coruña Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Industrial,

Rua Mendizábal s/n 15403, Ferrol, Galicia. España.

Tel/Fax: 0034 981 337410

armil@cdf.udc.es

Resumen

En éste trabajo se presenta un estudio orientado a obtener mediante el uso de la interferometría holográfica el comportamiento de piezas que han sido tratadas con láser de potencia. Cuando nos referimos a tratadas estamos indicando procesos derivados de la aplicación del láser de CO₂ o Nd-YAG tales como el corte, el endurecimiento por deposición de materiales o la soldadura.

En el caso particular del corte con láser se busca obtener resultados comparativos entre la aplicación de procesos industriales tales como el corte con prensa de corte rápido o guillotina y el corte con láser de CO₂. Por otra parte en el estudio de la deposición de metales sobre probetas metálicas, el objetivo es la localización de grietas en la coyuntura entre la probeta base y el material depositado así como también obtener información acerca de las tensiones residuales en la muestra terminada.

El análisis por interferometría holográfica con variación térmica del objeto permite obtener información cuantitativa y cualitativa acerca del comportamiento del objeto.

Las piezas analizadas asociadas al corte con prensa de corte rápido y su estudio comparativo con las piezas cortadas con láser de CO₂ muestran mejoras en la distribución de tensiones residuales en el segundo proceso así como también una dureza mas uniforme en la pieza terminada. Es posible observar además que tratándose de cortes realizados sobre chapas laminadas de hierro silicio es posible encontrar comportamientos particulares asociados en forma directa a la presencia de tensiones residuales debidas al proceso de laminación.

En lo referente a la detección de grietas en los procesos de deposición de materiales, analizadas una serie de muestras, el método aplicado (interferometría holográfica) demuestra ser conveniente y práctico.

La soldadura y su comportamiento es una línea de trabajo que se encuentra en desarrollo.

Los ensayos no destructivos a partir de la aplicación de la interferometría holográfica demuestran ser una herramienta de muy bajo costo que aporta información cualitativa y cuantitativa asociada al comportamiento de los objetos bajo estudio, ya sea se traten de piezas derivadas de procesos industriales o de obras de arte y su estado de conservación.

1. Introducción

El desarrollo de las diferentes técnicas basadas en la holografía fotográfica tuvo su auge en los 70 siendo dejada de lado a partir de la aparición de los ordenadores y del desarrollo de nuevas técnicas como la interferometría speckle digital, la cual aportaba información compatible con las técnicas anteriormente desarrolladas pero sin la necesidad del procesamiento de la película y permitiendo la aplicación simple de la técnica en tiempo real. Por otra parte con la interferometría holográfica de doble exposición se presentaban aspectos negativos respecto del análisis cuantitativo de las franjas existiendo diferentes métodos o aproximaciones para obtener una medida de la deformación. En todos los casos los resultados se obtenían mediante la cuenta del número de franjas y su posterior compensación en función del tipo de esquema adoptado. Métodos como los desarrollados por Liu and Kurtz (1977) para ensayos no destructivos permitían mediante una aproximación obtener la deformación del cuerpo en sus tres dimensiones, siempre asociado a un tipo de ensayo particular donde la deformación predominante es la denominada fuera del plano.

En años recientes ha tenido un gran campo de aplicación las técnicas de interferometría en el estudio del estado de conservación de obras de arte, donde un análisis cualitativo es usado mayormente para determinar puntos de desprendimiento de material ya sea en pinturas o esculturas, siendo utilizada la variación térmica como mecanismo de deformación del objeto bajo estudio.

El objetivo del presente trabajo es analizar la posibilidad de aplicación de la interferometría holográfica de doble exposición en la cuantificación del comportamiento de probetas metálicas sobre las cuales se han realizado procesos de deposición de materiales y corte mediante el uso de láser de alta potencia tales como el CO₂ o Nd-YAG.

La técnica utilizada es la de doble exposición con variación térmica del objeto, técnica que ha sido elegida debido a su sencillez de implementación y ante la imposibilidad de introducir deformaciones mecánicas conocidas debido al tipo de probeta bajo estudio.

2.1 Estudio del corte de partes E de núcleos de transformador.

2.1.1. Objetivo

El estudio comparativo y cualitativo de las piezas resultantes de los procesos de corte de partes E de núcleos de equipos auxiliares de iluminación, por métodos industriales ya establecidos como la prensa de corte rápido y la alternativa de aplicación del láser de

potencia, constituye el objetivo desarrollado para presentación que se detalla a continuación.

2.1.2. Procedimiento

La utilización de la técnica convencional de interferometría holográfica de doble exposición, usando la variación térmica del objeto, es la base de los ensayos realizados. Para su desarrollo se utilizó láser de He-Ne de 632,8 nm de 10 mW sobre un esquema de doble haz, doblemente filtrado con filtros espaciales de 15 μm para el haz del objeto y 5 μm para el haz de referencia. La ubicación del objeto respecto de la película es paralela con el fin de lograr en la imagen la superposición directa de las franjas sobre el objeto durante la observación del holograma resultante. La película usada es de soporte plástico Slavich PFG-01 con tiempos de exposición de 4 s por cada semiexposición parcial. Los procedimientos de revelado son convencionales de 4 pasos con tiempos de revelado de 4 m y de blanqueo de 1 m.

El material con el cual se fabrican las piezas E es hierro silicio, con un 2,5 a 3 % de silicio laminado y proveído en rollos.

La primera serie bajo estudio se realizó sobre muestras obtenidas de la línea de producción de una fábrica de equipos auxiliares de iluminación, destinados a lámparas de sodio de 70 W, en la cual en la etapa de corte se utiliza una prensa de corte rápido. Las muestras fueron seleccionadas aleatoriamente de ambas bocas de salida.

La segunda serie se realizó sobre muestras cortadas con láser de CO_2 , sobre material obtenido del rollo de alimentación de la prensa de corte rápido. El láser de funcionamiento continuo fue regulado a una potencia de 400 W, con una velocidad de corte de 2 m/m y utilizando como gas de aporte nitrógeno.

2.1.3. Análisis de partes E cortadas con prensa

Para la muestra catalogada como n° 1 se realizaron un total de 3 hologramas variando los intervalos de temperatura. El primer holograma de la serie fue realizado teniendo en cuenta intervalos de temperatura de 4 °C tomando como extremos 40 °C para la primera semiexposición y 36 °C para la segunda semiexposición. La toma de temperatura se realiza con una termocupla de rango k, con instrumento digital Metrix Ascy II 5390, en un punto considerado de referencia.

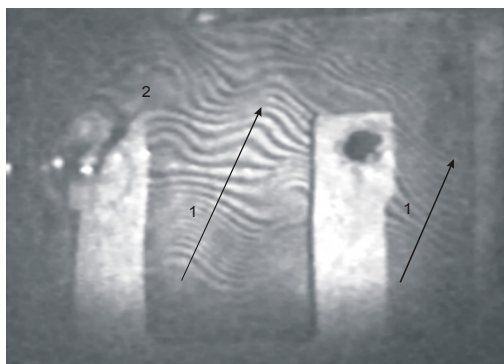


Figura 1. Holograma del núcleo E muestra 1, Δt de 4 ° C.

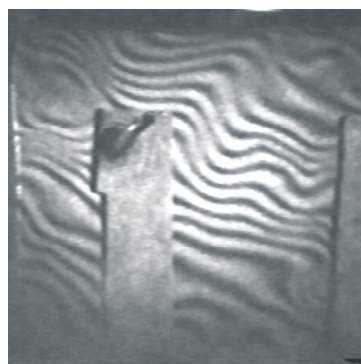


Figura 2. Holograma del núcleo E muestra 1, Δt de 2 ° C.

En la figura 1 puede observarse la imagen fotográfica resultante de la imagen provista por el holograma, con un ángulo de observación perpendicular al plano de la placa el cual es a la vez paralelo al plano del objeto, tanto en vertical como en horizontal.

El diagrama de franjas resultante en la zona central y lateral derecha (1) muestra una distribución casi homogénea de las mismas con un sentido de orientación vertical respecto del plano de la pieza pero encontrándose juntas debido a un intervalo de temperaturas elevado. No se observan deformaciones localizadas que indicaran tensiones residuales.

La figura 2, muestra la imagen fotográfica del holograma resultante, de la misma muestra pero para un intervalo de temperaturas menor, en éste caso 2 ° C, ubicando la primera semiexposición a 30° C y la segunda a los 28 °C. Nuevamente puede observarse la ausencia de franjas hiperbólicas o concéntricas que indiquen deformaciones localizadas.

En la muestra catalogada como muestra 2, se realiza una serie de 5 hologramas en diferentes intervalos de temperatura encontrándose un comportamiento diferente al presente en la muestra 1. En éste caso la información mas significativa es aportada por dos de los hologramas, el correspondiente a una variación térmica de 5 °C en el cual si bien las franjas pueden observarse notablemente juntas debido al intervalo de temperatura pueden observarse ordenamientos hiperbólicos de las franjas sobre el lateral superior izquierdo. En la zona indicada con el número 2 sobre la figura puede observarse una zona de poca deformación respecto a las franjas cercanas que la circundan. Estos ordenamientos son indicativos de una deformación localizada fuera del plano.

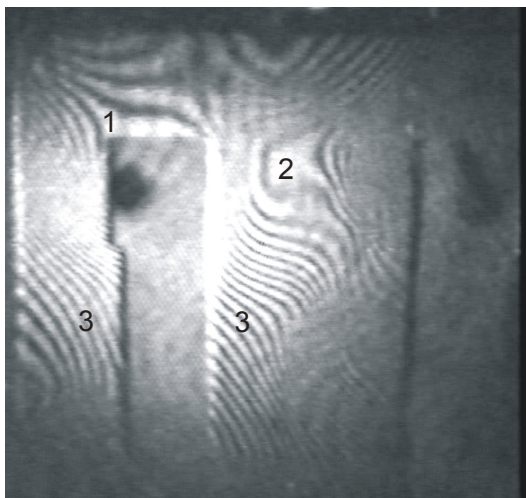


Figura 3. Holograma del núcleo E muestra 2, Δt de 5 ° C.

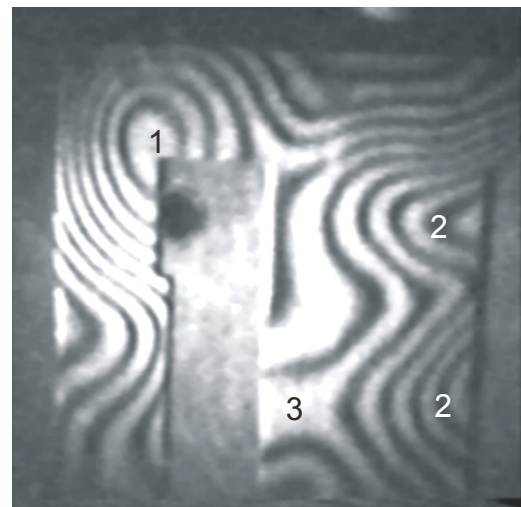


Figura 4. Holograma del núcleo E muestra 2, Δt de 2 ° C.

En la figura 4 puede observarse la imagen del holograma resultante para 2 °C de variación térmica pero con un ángulo de observación de 40 ° respecto de la perpendicular al plano del objeto y la película. La variación en el ángulo de observación permite magnificar el ordenamiento de las franjas que indican deformaciones fuera del plano, si el ángulo de observación fuera igual al de iluminación del objeto solo se registrarían estas. La imagen resultante muestra un claro ordenamiento que indica deformaciones fuera del plano en las zonas indicadas como 1, 2 y 3. La zona 1 muestra

que el centro de la deformación fuera del plano se sitúa en el ángulo interior de la pieza, fenómeno que puede ser asociado a tensiones residuales originadas en el corte.

Ensayos posteriores sobre nuevas muestras indican una similitud de resultados, es decir piezas de un comportamiento homogéneo en su distribución de franjas y piezas a las cuales puede considerárselas tensionadas.

Realizada una nueva búsqueda de muestras en la planta se nos informa que cada boca corresponde a una matriz diferente y que las matrices presentan diferentes desgastes en iguales ciclos de trabajo siendo esto una justificación válida para las diferencias encontradas.

2.1.4. *Análisis de partes E cortadas con láser*

En el proceso de corte de las chapas de hierro silicio, obtenidas de planta mediante el corte de cintas de 50 [cm] de longitud directamente del rollo laminado, se utilizó el láser de CO₂ en una potencia de 400 [W] usando como gas de trabajo nitrógeno para evitar los efectos asociados a la resistencia a la oxidación que presenta el silicio, encontrados por los investigadores de la UDC en etapas anteriores.

Como resultado del corte se pueden observar la presencia de rebabas las cuales se desprenden fácilmente ejerciendo una leve presión sobre ellas ya sea en forma directa con la mano o bien con el uso un filo. La presencia de las mismas hace que su aplicación a un proceso industrial implique una nueva etapa en la cadena de producción. De la observación de las piezas obtenidas no se notan zonas de afectación térmica importante salvo en los extremos superiores de la pieza donde existe una curvatura en el corte de dimensiones muy reducidas.

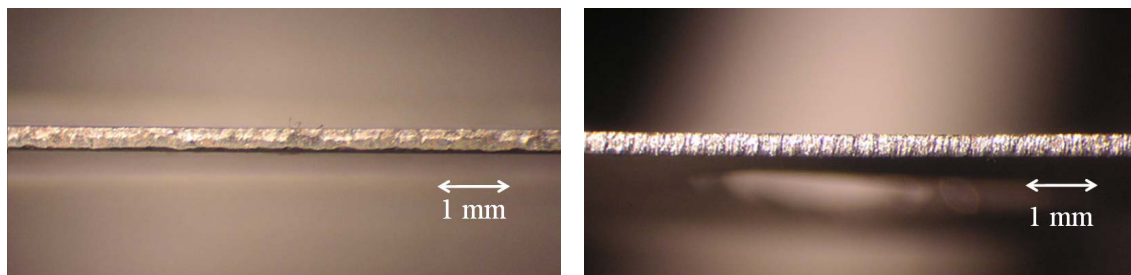


Figura 5. Detalle comparativo del corte resultante con prensa y con láser de CO₂

El análisis de la microdureza demuestra un comportamiento más homogéneo del la muestra cortada con láser que el de la muestra cortada con prensa, encontrándose que para zonas cercanas a la zona de corte con sizalla el borde presenta un punto de máxima dureza de 245 HV decreciendo luego a 148 HV tal como puede verse en la figura 6. En función de esto puede verse que la estructura final de la pieza resulta mucho más homogénea y por lo tanto con menores probabilidades de presentar tensiones residuales por efectos del corte.

En lo que respecta a la técnica de holografía se utilizó el mismo tipo de esquema y similares condiciones a las planteadas en el análisis del primer grupo de muestras.

Es de mencionar que en función de haberse observado la presencia de zonas de afectación térmica importante en los extremos superiores de las E cortadas con láser, donde existe una zona de corte o concavidad en el material que será usada posteriormente para la sujeción de las E en la conformación del núcleo, se procedió a

elaborar una pieza con curvaturas suaves, de manera de evitar éste fenómeno y de analizar los efecto de los cortes a 90°.

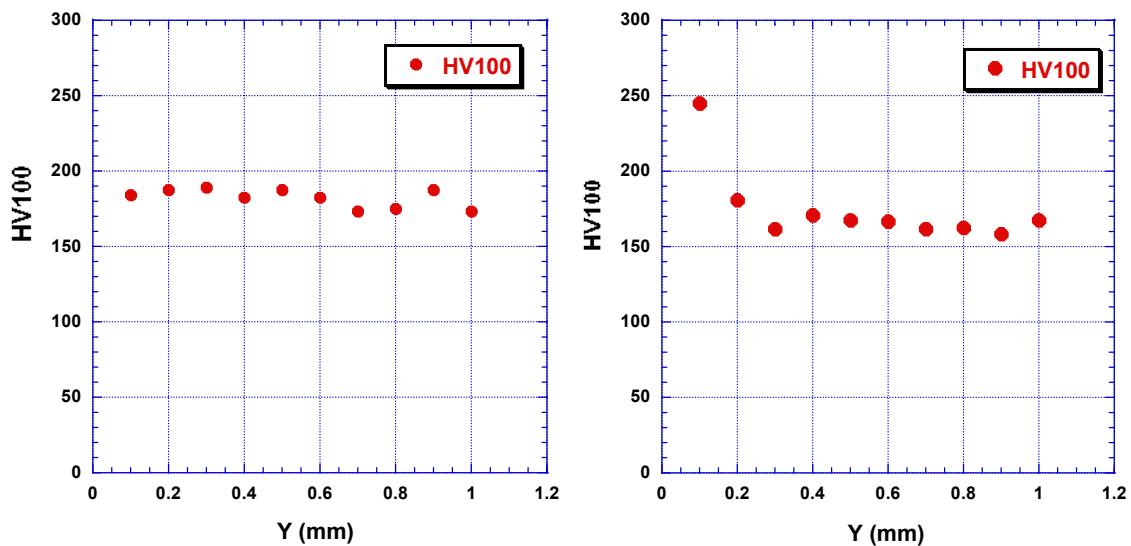
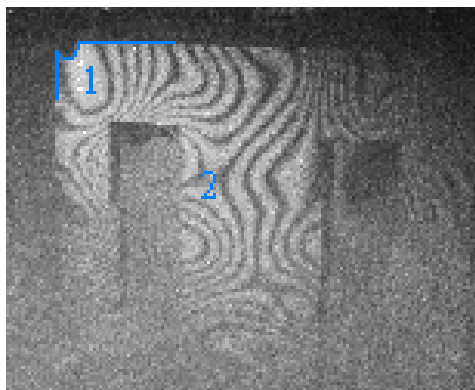


Figura. 6. Gráficos comparativos de microdureza de la zona cercana al corte con láser y en la zona cercana al corte con sizalla.

El primer holograma presentado corresponde a la muestra catalogada como 1-B, el cual fue realizado tomando intervalos de temperatura de 3 °C siendo los extremos 29 °C para la primera semiexposición y 26 °C para la segunda semiexposición.



**Figura 7. Muestra 1-B, Δt de 2 °C
Corte con láser de CO₂ - 400 Wcc**

En la figura 7 puede observarse la imagen fotográfica resultante de la imagen provista por el holograma, con un ángulo de observación de 30 ° respecto de la perpendicular al plano de la placa.

En el holograma resultante pueden observarse dos zonas particularmente interesantes, por un lado la zona indicada como 1 la cual muestra una franja cerrada sobre si misma y siguiendo la forma de la pieza en ese extremo. Con línea azul se ha resaltado la forma real del objeto y puede observarse como las franjas rodean el extremo superior izquierdo.

Esta zona debido al corte que se debe realizar por la morfología del objeto es la zona de mayor afectación térmica del cuerpo dado que el láser debe realizar una trayectoria

circular de un radio muy pequeño. Queda claro que esta zona de afectación térmica condiciona el comportamiento de la pieza a la dilatación. En función de la distribución de las franjas puede definirse que la zona 1 presenta una dilatación diferente del resto de la “E” en la cual se nota uniformidad.

La zona 2 presenta cierta similitud en la distribución de franjas con las observadas para la muestra 2 de la figura 4.

En la muestra catalogada como muestra 2-B, se observa un comportamiento ante la dilatación más uniforme, al ser observado con un ángulo de 40° respecto de la horizontal, observándose deformación alineal en la zona de afectación térmica, pero una notable uniformidad en la rama central de la parte E del núcleo. El intervalo de temperatura tomado fue de 2°C .

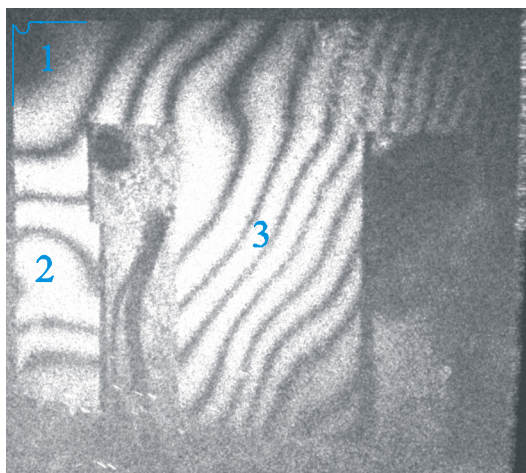


Figura 8. Muestra 2-B Δt de 2°C

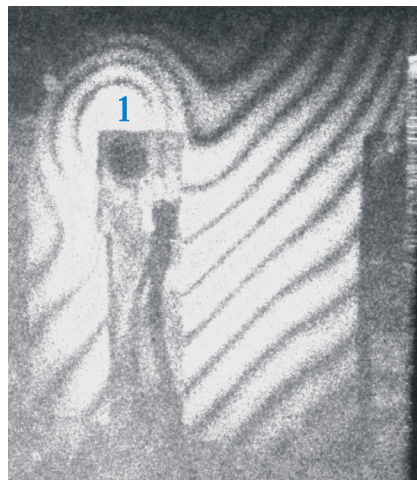


Figura 9. Muestra 3-B Δt de 2°C

Nuevamente observamos que existe similitud en la rama central con una pieza cortada por prensa, esto es la muestra 1 en la figura 2.

En el análisis de la muestra catalogada como 3 – B, manteniendo un intervalo de temperatura de 2°C . Al ser observada la figura 9, la cual fue obtenida con un ángulo de observación de 35° , podemos ver claramente que la rama central del núcleo presenta una deformación uniforme pero se puede apreciar una zona de deformación alineal y localizada en el ángulo interior izquierdo, tal como fuera observado en la muestra 2 figura 4.

2.1.5. Análisis de partes E cortadas con láser de forma modificada

En la presentación sucesivas las piezas analizadas corresponden a muestras modificadas morfológicamente, según el esquema de corte mostrado en la figura 10. En éstas se eliminaron los puntos angulares externos y se introdujeron curvas en lugar de ángulos en los cortes interiores. Las condiciones de obtención de los hologramas son similares a las aplicada anteriormente, con intervalos de temperatura de 2°C en todos los casos.

Para la muestra catalogada como 6-C, figura 11. Las franjas se presentan en una distribución poco homogénea repitiéndose los patrones observados en casos anteriores en la zona 2. La zona 3 aparece como una zona de deformación localizada de tipo

perpendicular. Entre la zona 1 y la 2 se nota una ausencia casi total de franjas, es de destacar que en la zona 1 desaparece todo indicio de deformación localizada.

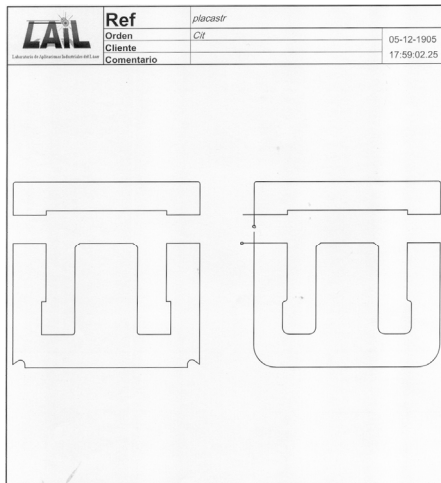


Figura 10. Diseño de piezas introducidas en el CNC, del láser

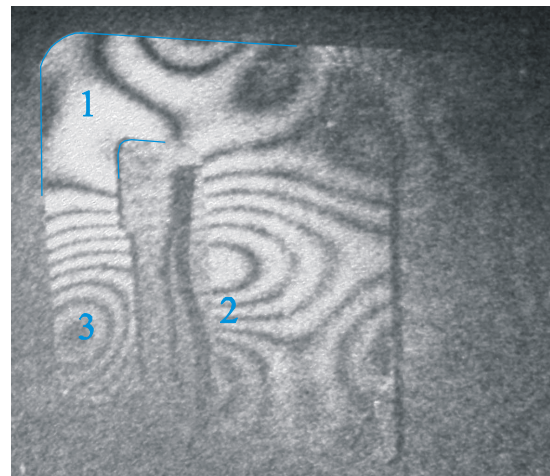


Figura 11. Muestra 6-C, Δt de 2 ° C.

Par a la muestra catalogada como 7-C se repiten las condiciones de obtención del holograma y con ángulos de observación similares, 35° respecto de la normal, es posible obtener la fotografía mostrada en la figura 12. En ésta nos encontramos con una zona 1 prácticamente desprovistas de franjas al igual que en la muestra 6-C. Por otra parte se repiten los resultados en la zona 2 ya observados en otros hologramas.

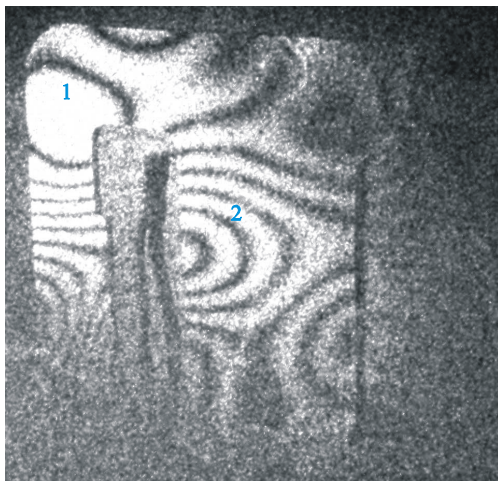


Figura 12. Muestra 7-C, Δt de 2 ° C.

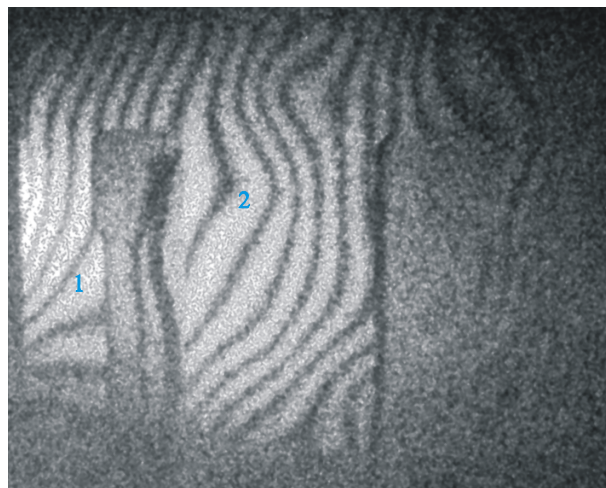


Figura 13. Muestra 8-C, Δt de 3 ° C.

En la muestra catalogada como 8-C, analizada bajo igual ángulo de observación e intervalo de temperatura de 3 °C, se puede observar una uniformidad en la distribución de franjas tanto en las zona 2 de la figura 13, como en la zona 1. Nuevamente en las muestras cortadas con láser y morfológicamente modificadas desaparecen ordenamientos de franjas localizadas y alineales en las zonas de corte interiores.

2.1.6. Análisis comparativo de partes E cortadas con prensa de corte rápido y láser de potencia

De lo presentado anteriormente se puede observar que existen tres tipos diferentes de ordenamiento en las franjas, comportamiento homogéneo, distribuciones de deformación localizada en los ángulos y distribución alineal en el centro de las E.

La distribución homogénea es posible encontrarlas en diferentes muestras ya sean la muestra 1 de corte con prensa (figura 2), la muestras 2-B y 3-B (figuras 8 y 9) de corte con láser y en la muestra 8-C de corte con láser y pieza modificada (figura 13). Por otra parte encontramos que las deformaciones alineales en el centro de las E se presentan también en los tres tipos diferentes de muestras; en la muestra 2 del corte con prensa (figura 4), en la muestra 1-B del corte con láser (figura 7) y en la muestras 6-C y 7-C del corte con láser modificado.

Las deformaciones localizadas en las zonas de corte son visibles en las muestras 2 (figura 4) de corte con prensa, en las muestras 1-B, 2-B y 3-B (figuras 7, 8, 9).

En función de esto vemos que existen tres tipos de deformaciones, las producidas por efecto del corte en función de la morfología del cuerpo o la afectación térmica de la pieza que generan tensiones residuales las cuales desaparecen al redondear los ángulos (piezas modificadas).

Deformaciones que representarían tensiones residuales debidas al proceso de laminación del material y que se verían localizadas en diferentes puntos del fleje, esto debido a la existencia de muestras con un comportamiento totalmente lineal y muestras con deformaciones particulares en la parte E del núcleo, independientemente del tipo de método de corte o forma de la pieza. .

2.2 Localización de fracturas en la zona de coyuntura de dos materiales

2.2.1 Aspectos generales.

Durante la deposición de materiales sobre metales con láser de potencia se presentan una serie de fenómenos asociados al alto nivel de temperaturas involucradas durante el proceso que pueden estar produciendo variaciones en las características propias del material de base. Por otra parte es de interés conocer el comportamiento de la zona de unión entre el material base y el material depositado.

La interferometría holográfica de doble exposición permitiría el análisis de ambas situaciones encontrando comportamientos dinámicos particulares que no hayan sido predichos u observados por otros métodos.

En el proceso de deposición un sustrato de acero es usado para depositar un recubrimiento de aleaciones metálicas o cerámicas en forma de polvo granulado el cual es refundido junto al sustrato por el láser. Las potencias del láser suelen ser elevadas, entre 1200 W y 2000 W dependiendo de la aleación, el espesor de la franja depositada y la velocidad de avance del láser.

2.2.2. Procedimiento.

Para el estudio de la zona de coyuntura se trabaja sobre una probeta con una deposición de espesor medio 1,5 mm, realizando un corte transversal sobre ésta de manera de dejar visible la zona de coyuntura entre ambos materiales. La hipótesis planteada en función

de estudios precedentes realizados por medio de microscopia electrónica se orienta a la existencia de fracturas en los laterales de la zona depositada, debido a menores temperaturas durante el proceso de refusión de los materiales.

En la figura 14 se muestra una pequeña probeta de máximo espesor en la deposición.

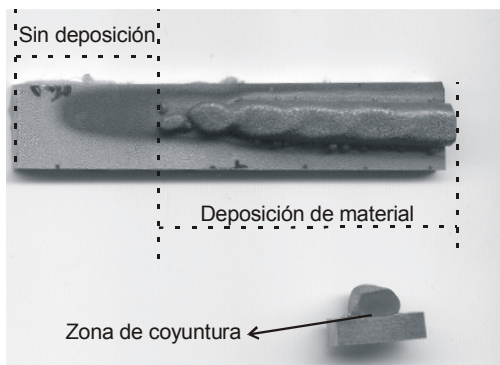


Figura 14. Probeta depositada.

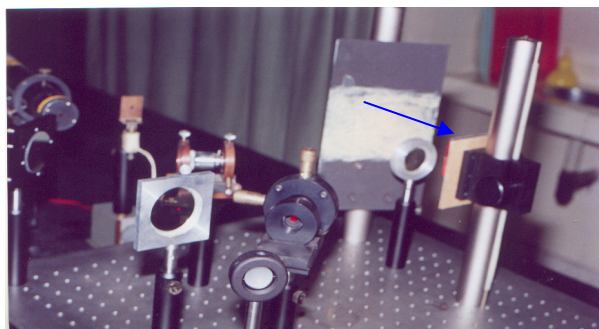


Figura 15. Esquema para la realización de los ensayos holográficos.

Respecto de la técnica de holografía utilizada, es similar a la presentada en el caso de las partes E de núcleos. La particularidad es el agregado de una lente de distancia focal 7 cm que es ubicada entre el objeto y la película a una distancia de 5 cm del objeto. Esto con el fin de obtener una imagen ampliada de la zona de coyuntura, dado que ésta resulta muy pequeña para ser analizada.

La técnica holográfica utilizada es la de doble exposición con variación térmica del objeto, utilizándose intervalos de temperatura de 3 °C. La muestra es inicialmente sometida a un proceso de calentamiento de 24 h en horno de temperatura constante a 100 °C. Durante la realización del ensayo se realizan las semiexposiciones con variación térmica decreciente.

En la figura 15 puede verse el holograma de calibración o patrón de técnica, en el cual puede observarse claramente la pieza cortada transversalmente, la lente usada como lupa y una probeta con deposición completa.

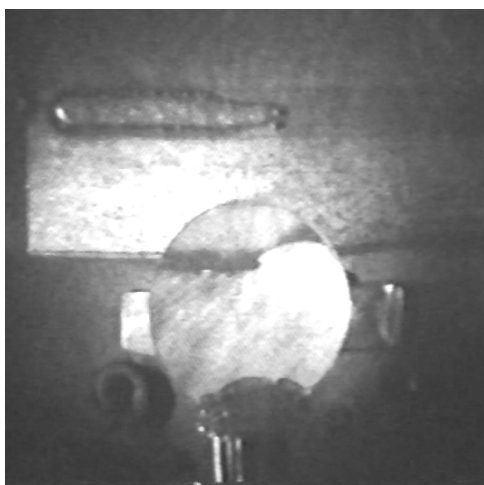


Figura 15: Holograma patrón.

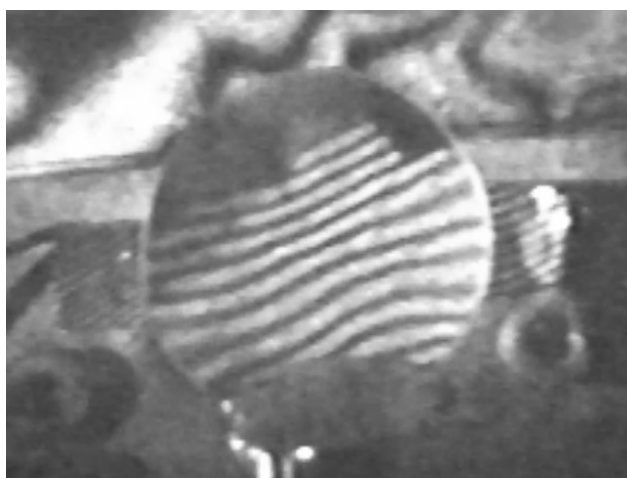


Figura 16: Imagen resultante del holograma interferométrico, Δt de 2 ° C.

En la figura 16, correspondiente al holograma interferométrico, puede observarse la presencia de un patrón de franjas distribuido uniformemente, no viéndose en ningún punto una discontinuidad o quiebre entre las franjas que indiquen discontinuidad en el comportamiento durante la contracción del material. En particular puede observarse como la zona de coyuntura, en el lateral derecho, presenta la naciente de una franja oscura la cual puede seguirse a lo largo de la pieza con una desviación mínima respecto de una recta.

De la observación del holograma mostrado en la figura 16 puede concluirse que la muestra bajo estudio no presenta problemas en la refusión de los materiales.

2.3 *Análisis cuantitativo de la dilatación de una probeta de acero AISI 304.*

2.3.1. *Aspectos generales*

El análisis cuantitativo de los hologramas interferométricos se basa en la cuenta del número de franjas ya sea por observación y cuenta directa o bien obteniendo el perfil de intensidades. El número así obtenido guarda relación con la diferencia de fase total entre la franja de menor orden y la de mayor orden, asociando la de menor orden con la menor deformación del objeto bajo estudio. La relación entre el número de orden y la deformación puede ser obtenida mediante planteos matemáticos asociados a la deformación en cada una de las dimensiones (Hariharan, 1996).

En la interferometría holográfica de doble exposición con variación térmica la fase relativa no puede ser determinada dado que se desconoce el sentido de la deformación (Brandt, 1977) en la coordenada z, coincidente con la dirección normal al plano del objeto. La magnitud de la deformación puede ser obtenida a partir de:

$$\Delta\phi = k\Delta\ell \approx -\frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta_i + \cos\theta_o)\Delta z \quad (1)$$

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda}(\sin\theta_i - \sin\theta_o)\Delta x \quad (2)$$

$$\Delta\phi \approx \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{H} \right) \Delta y^2 \quad (3)$$

para cada una de las dimensiones del objeto. Las expresiones son obtenidas del análisis de las deformaciones para cada una de las dimensiones obtenidas de la figura 17.

La deformación general puede ser definida de igual manera y aplicando una aproximación de segundo orden.

$$\begin{aligned} \Delta\ell \approx & (\sin\theta_i - \sin\theta_o)\Delta x + 0\Delta y - (\cos\theta_i + \cos\theta_o)\Delta z + \\ & + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\cos^2\theta_i}{S} + \frac{\cos^2\theta_o}{H} \right) \Delta x^2 + \left(\frac{1}{S} + \frac{1}{H} \right) \Delta y^2 + \left(\frac{\sin^2\theta_i}{S} + \frac{\sin^2\theta_o}{H} \right) \Delta z^2 + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\sin\theta_i \cos\theta_i}{S} - \frac{\sin\theta_o \cos\theta_o}{H} \right) \Delta x \Delta z \right] \end{aligned} \quad (4)$$

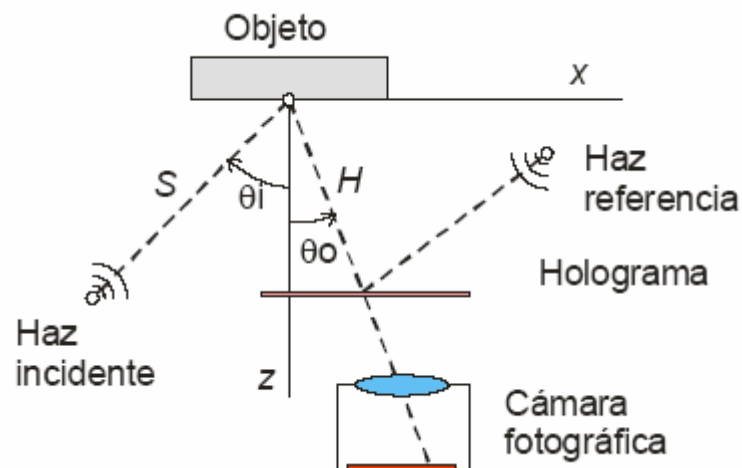


Figura 17. Esquema de análisis para las ecuaciones.

2.3.2. Procedimiento

Se realiza un holograma interferométrico sobre una probeta de acero AISI 304 de coeficiente de dilatación $17,3 \mu\text{m} / \text{m}^{\circ}\text{C}$, sometida a un proceso de estabilización de temperaturas de 24 hs en horno a 100°C . El holograma se realiza en dos semiexposiciones separadas por 8°C , con procedimientos similares a los enunciados anteriormente.

El holograma resultante puede ser visto en la figura 17 .

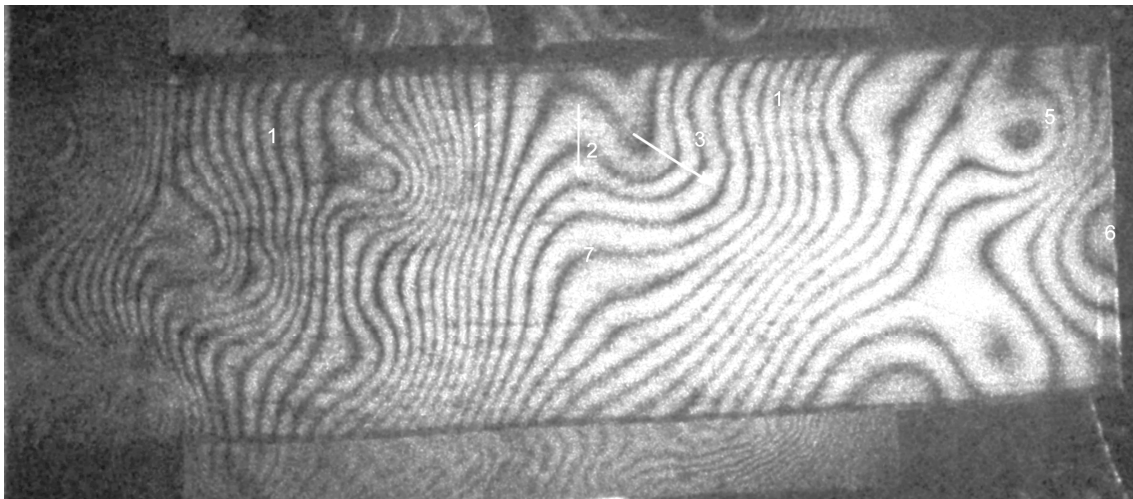


Figura 17: Probeta de acero AISI 304, ΔT 8°C , alto 50 mm, largo 160 mm, espesor 10,3 mm.

El número resultante de franjas corresponde a 47 las cuales pueden ser contadas en forma directa.

Cada franja se corresponde con un cambio de fase de 2π por lo que el cambio total en la fase sería de 295,6 radianes.

Si aplicamos el resultado obtenido a la deformación en x, la cual es la deformación que debería prevalecer en cuanto a su magnitud para una contracción térmica, nos encontramos que el valor resultante se ubica muy por encima del valor esperado para una dilatación de éste material con éste intervalo de temperaturas.

Si por el contrario estimamos el número de franjas a partir de la ecuación (2), vemos que debería producirse para ésta diferencia de temperaturas una diferencia de fase total de 152,8 radianes, por lo que el número de franjas debería ser 24.

Esta diferencia no es una diferencia menor por lo cual se elaboraron simulaciones computacionales basadas en aplicaciones de rutinas en Matlab®, con el fin de corroborarlos datos y establecer posibles causas de la diferencia.

Éstas rutinas basadas en las ecuaciones 1 a 4 permiten obtener modelos de franjas asociadas a la pieza bajo estudio, así es posible la deformación en un solo sentido, en dos dimensiones o bien deformaciones localizadas.

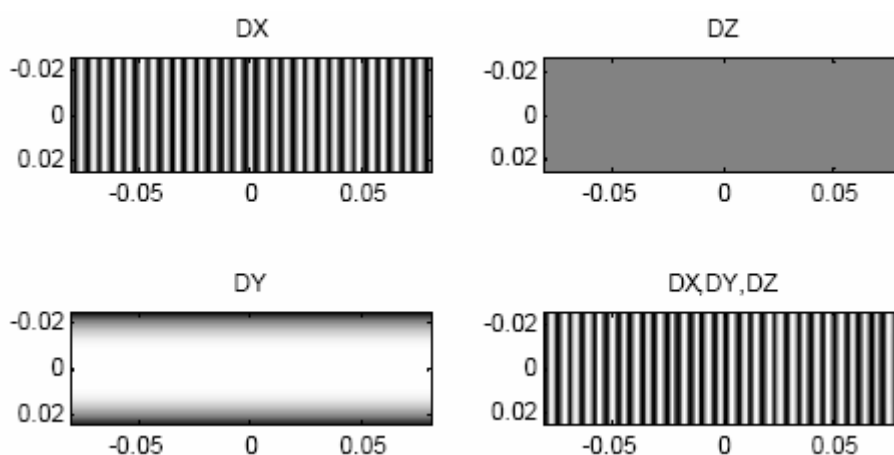


Figura 18. Resultado de la simulación de una deformación por dilatación para 10 °C en el sentido longitudinal de la pieza.

En la figura 18 se muestra el resultado de aplicar las rutinas antes mencionadas a una dilatación unidimensional. Como puede verse el número de franjas resultantes para las tres dimensiones es el mismo que para la deformación en x.

Del resultado de la simulación queda claro que para que el número de franjas aumente y se cumpla lo observado en el holograma de la figura 17, debería existir una deformación en y o en z. Las deformaciones en y resultan ser de un orden de magnitud menor a las de x o z debido al término cuadrático de la ecuación 3 que las define, por lo cual la deformación debería ser en el sentido de z.

Una posibilidad es considerar una deformación de tipo flexión de la barra en el sentido de z y a lo largo de x. La simulación resultante puede observarse en la figura 19.

En este caso se introdujo un intervalo de temperatura de 10 °C y una flexión total de la barra de 12 μm . El número total de franjas pasa de 30 a 62 como resultado de la combinación de ambas deformaciones.

La segunda posibilidad es considerar una deformación o desplazamiento angular en el sentido de las z pero con cambio a lo largo de y. En éste último caso, la simulación, no indica nuevas franjas si no un ordenamiento que tiende a la inclinación del patrón tal como puede verse en la figura 20.

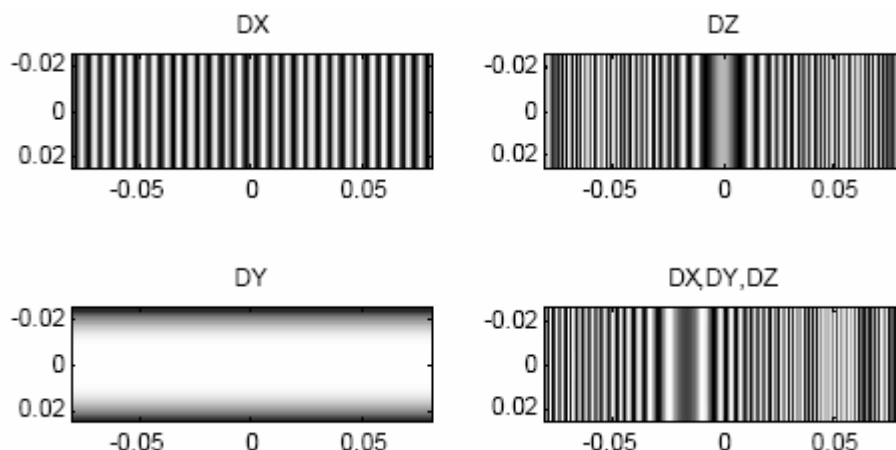


Figura 19. Resultado de la simulación para una deformación en flexión, a lo largo de x en el sentido de z, ΔT 10 °C.

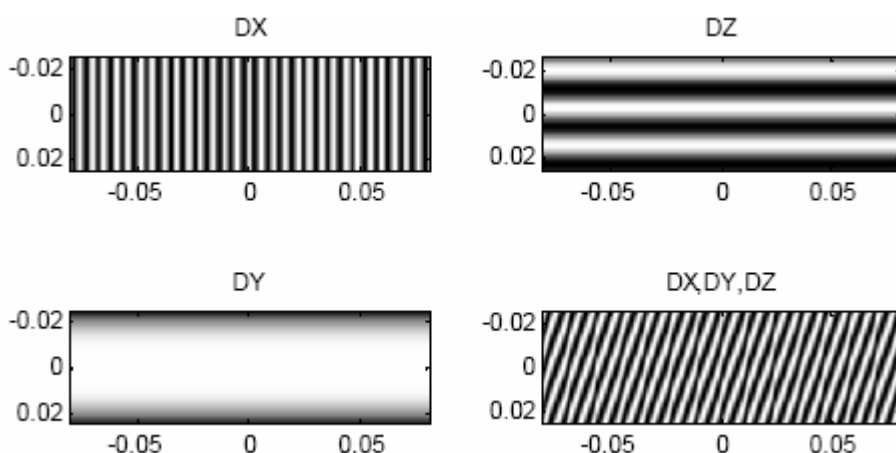


Figura 20. Resultado de la simulación de introducir una deformación en z a lo largo de y, ΔT 10 °C.

En función del resultado de las simulaciones se debe concluir que la deformación que se registra en el holograma, representa una deformación en x coincidente con la deformación atribuible a una dilatación es decir 22,14 μm , más una deformación del tipo flexión equivalente 142,8 radianes de diferencia de fase total o bien una deformación en z máxima de 4.85 μm .

3. Conclusiones

En el presente trabajo se muestran tres posible análisis asociados a las técnicas interferometría holográfica, un análisis puramente cualitativo basado en la comparación de una serie de hologramas obtenidos a partir de diferentes muestras correspondientes a diferentes métodos de fabricación. Análisis que aporta información importante acerca del comportamiento de las piezas y la posibilidad de lograr mejores montajes del producto final, en este caso equipos auxiliares de iluminación, afectando entre otros parámetros el factor de apilado, la emisión sonora y las pérdidas de potencia.

En el segundo caso se busca mediante la técnica de interferometría holográfica de doble exposición con variación térmica del objeto encontrar fracturas en la unión de dos materiales diferentes producida mediante refusión con láser de potencia. Aquí nuevamente este tipo de ensayo demuestra su capacidad de aportar información en forma clara, simple y económica.

En el tercer caso se avanza sobre las técnicas de medición por interferometría holográfica, aquí la sola aplicación del método no resulta suficiente siendo necesario el aporte de técnicas computacionales avanzadas para la obtención de los resultados finales.

En todos los casos la interferometría holográfica sigue siendo un tipo de ensayo de bajo costo, el cual aporta gran cantidad de información y que actualmente se ve potenciado a partir de la aplicación de sistemas informáticos de alta capacidad, ya sea a partir de las simulaciones o bien de las nuevas técnicas de holografía digital (Takao, 2001).

Agradecimientos.

A la Universidad de La Coruña

A la Universidad Tecnológica Nacional.

Al Sr. Ramiro Prodan, de la Empresa Italavia –ELT Argentina.

Referencias.

Liu and Kurtz, Handbok of Optical Holography, Academic Press, Chapter 8, First Edition 1977.

P. Hariharan, Optical holography Principles, Techniques, and Applications. Second Edition 1996. Cambidge University Press.

G Brandt . Handbok of Optical Holography, Academic Press, Chapter 8, First Edition 1977.

Shoko Takao^a, Satoru Yoneyama^b, Masahisa Takashi, Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry, Optics And Laser In Engineering, Vol 38 pag. 233–244, November 2001.

NDT testing by holographic interferometry applied to the structural diagnostic of artwork conservations by means of sound wave excitation

Fabio Vincitorio^{*a}, Alberto Ramil^b, Ana J. López^b, Emilio Saavedra^b, Armando Yáñez^b

^aFacultad Regional de Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, Paraná, Entre Ríos, Argentina

^bDepartamento de Enseñaría Industrial, Centro de Investigaci3n Tecnol3gicas, Universidade da Coruña, 15403 Ferrol, Spain

ABSTRACT

Techniques based on holographic interferometry have achieved a mature state of non destructive testing applications in industry and nowadays they are rising as interesting and promising tools in the field of conservation practices; giving information about the condition of structural integration of artworks. In the practice of these techniques it is necessary to generate a relative deformation in the object under study. Depending of the characteristics of the artwork, different methods may be used to achieve the desired displacement; being thermal excitation by means of filament lamps and wave sounds generated by speakers the most common. By applying these methods the deformation process usually involves a large area of the object, which limits the information obtained of a finite region. However, the use of a wave sound emitter of small dimensions, like a low power monotone buzzer, allows to decrease the affected area and to obtain information about the structural integrity of localized points of the surface.

In the present study conventional double exposure double way holographic technique based on holographic films was used to obtain an out of plain deformation pattern caused by a sound emitter in an oil painting which has suffered heavy structural damage. Optimization of the excitation sound wave characteristics (frequency and amplitude) and the adjustment and calibration of the experimental set up, in order to obtain precise information about the physical and mechanical integrity of localized points of the painting are reported.

Keywords: NDT, holographic interferometry, sound wave excitation, artworks

1. INTRODUCTION

The conventional holographic technique and its application in non destructive testing (NDT) born immediately after the development of the laser source in 1962. Many type of testing was implemented by different researchers principally in the '70 by application of different ways of excitation of the object under study. In 1972 with the presumption of catastrophic flood, a large oscillator/amplifier ruby laser was assembled in Venice and around 50 full-sized in-situ holograms of statues were produced for archival reference in the event that the original statues were lost. This fact represent the first antecedent of use of holography in the area of artwork conservation¹.

The technique of holographic interferometry is a method of testing in continuous development concerning different types of lasers and different kind of experiments; however all of them present as main characteristic not to affect the object under study. Basically the NDT holographic technique is implemented by using a double exposure procedure which consists of a few basic steps: Firstly the recording of the object in its initial condition is performed; then a excitation is induced to the surface and then, the recording of the object is performed in its displaced condition. The excitation may be dynamic or static; in the first case the displacement is caused by a time constant or harmonic movement with constant amplitude such as a sound wave. In the second case the displacement is caused by mechanical deformation in one or more known directions. A special arrangement commonly used in the testing of art works is based on thermal excitation (deformation) of de object under study. Thermal excitation, however, can be troublesome due to the difficulties of achieving an homogenous heating of the object and therefore the loss of information². Anyway, the objective of holographic interferometry in the field of artwork conservation is usually to detect different kind of damage in the artistic workpiece such as detachments, cracks or pollution in its surface.

In this work we present a methodology based on double way-double exposure holographic interferometry by means of sound excitation with the objective of application to the analysis of paint work. The first step consisted in the development of the experimental set-up adapted to the analysis of the artistic workpiece and the adjustment of the parameters involved, mainly related to the holographic technique and with the level of the sound wave of excitation required to generate enough deformation on the paint layer to produce useful holograms. As case study the application of the technique paint from the Italian artist S. Vercelli is presented. The artwork was part of a landscape series “Pesche In Fiore” and was painted with the technique of oil on wood around 1920. Due to long time suffering poor conditions of storage the paint surface is covered with a thick layer of dirt; furthermore, the detachment of some areas of the surface probably caused by blows can be also appreciable.

2. PHYSICAL PRINCIPLES

2.1 Double way double exposure holography

The double way holographic technique is based on the utilization of a double optics way. The light emitted by the laser is divided by means of a beam splitter in reference ray and object ray, both carrying 50 % of intensity. Double exposure holographic interferometry refers to the use of two different holograms recorded in the same recording medium (film, ccd,...). The first hologram is obtained when the object under study presents a volume V_1 and the second one when it has a volume V_2 . In both exposures the reference beam is the same. If the difference in optic ways between both exposures is the order of several wave-lengths of the laser light, the resulting hologram consists of a pattern of interference fringes superimposed the image of the object. This method allows the study of static or dynamic displacements of rough surface with interferometric precision.

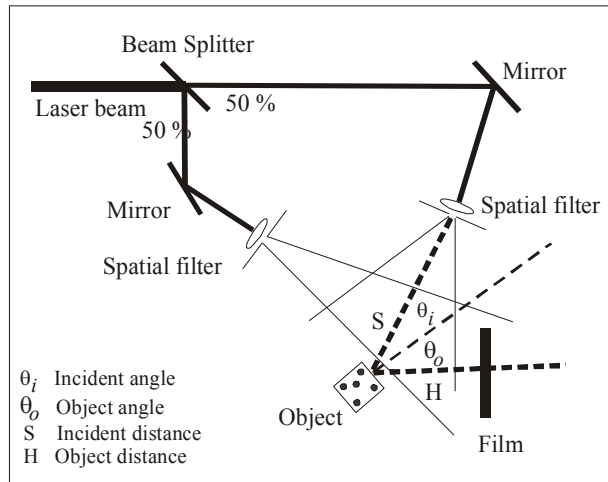


Fig. 1. Sketch of double way holographic recording technique.

Mathematically, when an object O is illuminated by coherent light, a point P of its surface scatters light in all directions, some of which arrives to the recording plane F (film) through path H , as shown in Figure 1. If the direction of the light scattered by the object changes between the first and the second exposure, the image obtained is the superposition of the reference wave, $U_r(x,y)$, the first exposure wave, $U_1(x,y)$, and the second exposure wave $U_2(x,y)$. When the final hologram, composed by two semi-holograms is reconstructed their superposition gives a visible interference pattern³. Equation (1) represents the wave scattered by P before introducing a change in the object; with $\phi(x,y)$ the phase information related to the object (shape, depth, etc), and equation (2) represents the scattered wave after the change, where $\Delta\phi(x,y)$ encodes any known or unknown load induced in the object.

$$U_1(x, y) = a(x, y) \cdot \exp[-j\phi(x, y)] \quad (1)$$

$$U_2(x, y) = a(x, y) \cdot \exp\{-j \cdot [\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)]\} \quad (2)$$

The final image, which is directly related with irradiance $I(x,y)$, is given by equation (3) where $2\alpha^2(x,y)$ represents the amplitude of the object image, $\Delta\phi(x,y)$ is the phase difference due to changes in volume (deformation or displacement) of the object under study between both exposures, and the intensity of interference fringes is given by the cosine term.

$$I(x,y) = |U_1(x,y) + U_2(x,y)|^2 = |2 \cdot \alpha(x,y)|^2 \{1 + \cos[\Delta\phi(x,y)]\} \quad (3)$$

In order to illustrate the theoretical background exposed above, Figure 2 shows the hologram obtained by the double way-double exposure method of a metallic object submitted to thermal excitation. The interference pattern shown in Figure 2a) is related to dilatation of the object due to heating. Figure 2b) depicts the intensity distribution profile obtained by the digitalized image of the hologram.

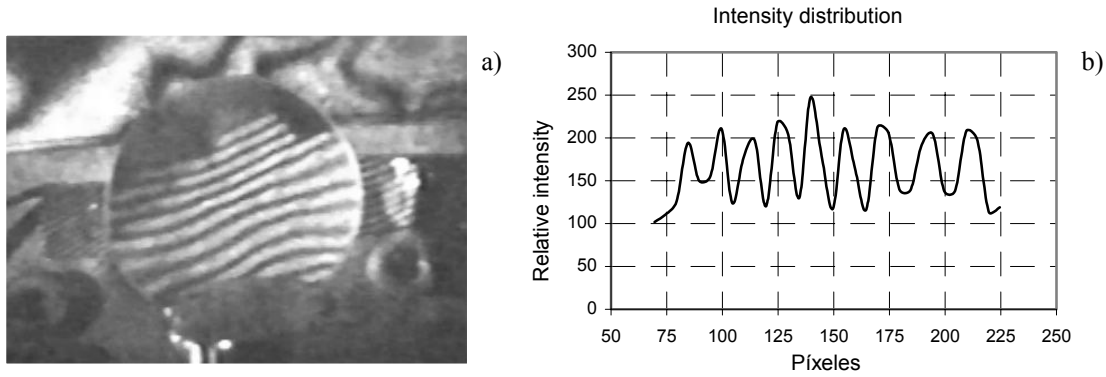


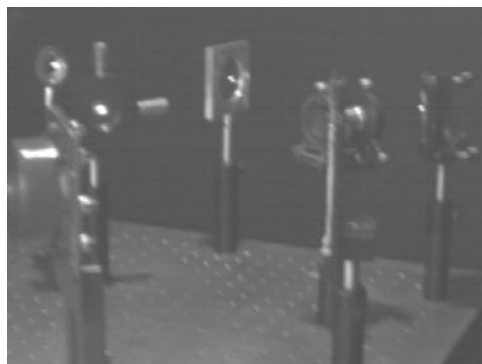
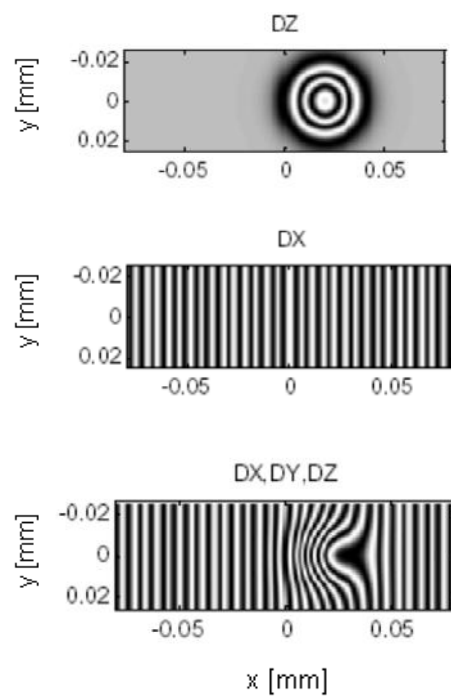
Fig. 2. Double way-double exposure interferometric hologram of a metallic object submitted to thermal excitation, a). Intensity distribution profile of the interference pattern, b)

2.2 Localized excitation of the object.

In the special case of the analysis of paintings, the object under study is a plane surface and the changes provoked by the excitation source take place in the perpendicular direction, where the elasticity of the paint layer is higher. Considering the surface of the object in the X-Y plane; the out of plane deformation will occur in z direction. The interference pattern obtained in a double exposure hologram is given by equation 4, where θ_o and θ_i correspond to the object and incident angles, respectively (see Figure 1), k is the wave number and $\Delta\ell$ the length path difference caused by deformation in z direction s between both exposures.

$$\Delta\phi = k\Delta\ell \approx -\frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta_i + \cos\theta_o)\Delta z \quad (4)$$

From equations (3) and (4), it is clear that the distribution of intensities in X-Y plane depends on the distribution of deformations, Δz , in X-Y plane. In the case of deformation involving more than z direction, the interference pattern is a combination of patterns corresponding to different displacements. Figure 3 depicts computer simulations of holographic interferometry patterns, $I(x,y)$, corresponding to: a) Pure z localized deformation; b) Linear dependent displacement, Δx , along the x direction, and c) Combination of both a) and b) deformation distributions. As it can be appreciated from the plots, case a) gives a circular distribution of the interference fringes centered in the point in which pure z deformation was concentrated; conversely a uniform deformation as in case b) produces a pattern of parallel fringes. Plot c) represents a more realistic case in which both kind of deformations are acting on the surface of the object under study.



3.2 Adjustment of the experimental parameters

In order to obtain useful interferometric holograms in terms of visibility of the fringes by means of sound wave excitation it is necessary a previous adjustment of the variables affecting the amplitude of the sound wave, the input current, and other characteristics related to the holographic technique. With this purpose, a special testing device consisting basically of a membrane (paper foil) and a buzzer was designed as it is shown in Figure 5. By using this device, holograms of the membrane mechanically excited by the sound emitted by the buzzer could be obtained at different values of the parameters involved to optimize the experimental conditions.

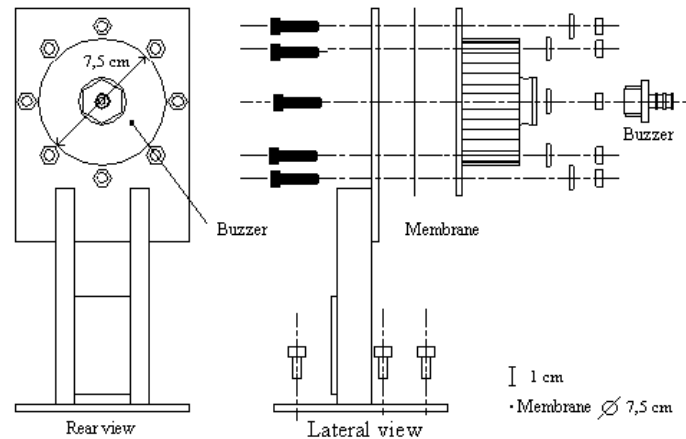


Fig. 5. Testing device consisting of a membrane (paper foil) and a buzzer.

First of all the optimum time exposure to achieve the holographic images formed, was 8 s for a single exposure (Figure 6). This high exposure is caused by the low power of the laser source used. The input intensity of the buzzer was adjusted in order to obtain the adequate value of displacement in the membrane. Given that the sound wave generated by the buzzer is time variable, the response of the membrane obeys to the resonant modes and therefore the displacement may be different from the fundamental mode. Figure 7 shows the holograms obtained by feeding the buzzer with a DC current intensity of 9.1 mA and 4.6 mA. In both cases the holograms depict a pattern of fringes with tree nodes witch may correspond to localized pure z deformation, in addition with a distribution of linear fringes which may be closed in the border of membrane. However, as it can be appreciated, the hologram obtained with 9.1 mA presents better definition than in the other case. The maximum value of displacement in z direction, calculated by using equation 4, is $1.27 \mu\text{m}$ at the input intensity of 9.1 mA, when $\theta_1 = \theta_0 = 30^\circ$ however a displacement of $0.525 \mu\text{m}$ is obtained when the angle of observation is $\theta_0 \approx 20^\circ$ and the input current 4.6 mA, figures 8a) and 8b).

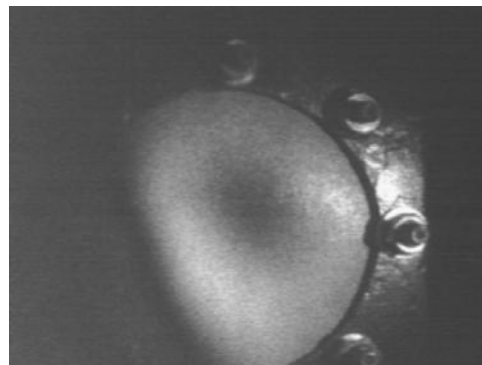
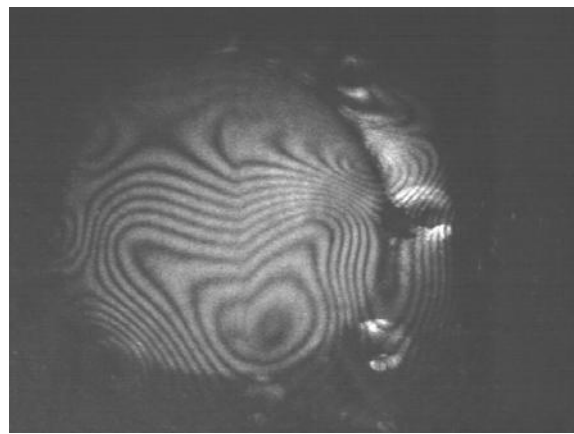
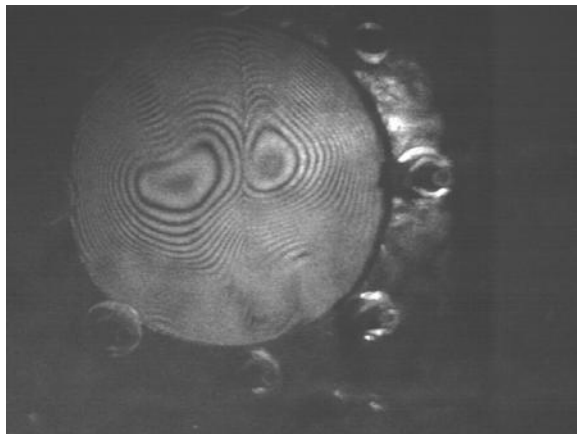
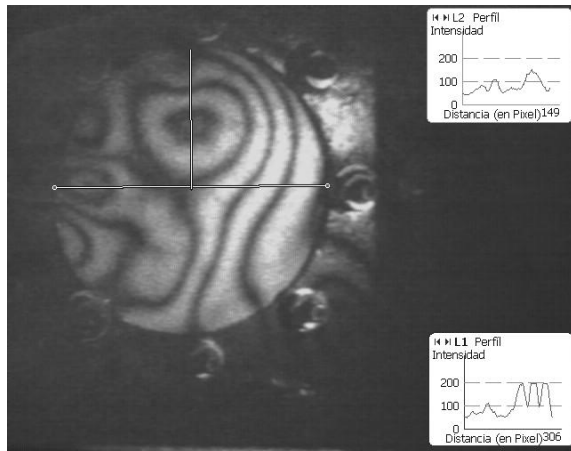
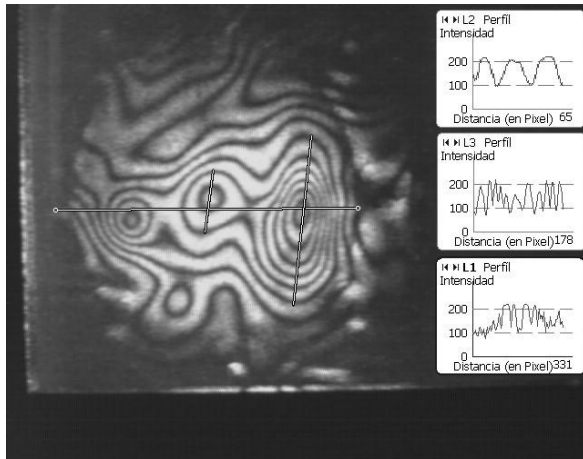


Fig. 6. Single exposure image of the interferometric holography used to adjust the exposure time.



about 1.5 cm of diameter could be appreciated, was selected to study (Figure 10a). The paint was fixed to the isolation table by using removable magnets in the base and iron columns with zippers to avoid vertical displacement. Figure 10b) shows how the area under study is located in front of the holographic film. The buzzer is glued with contact adhesive to a protective cardboard placed in the rear side of the paint (Figure 10c).



Fig. 9. Vercelli's oil paint "Pesche in Fiore" series.

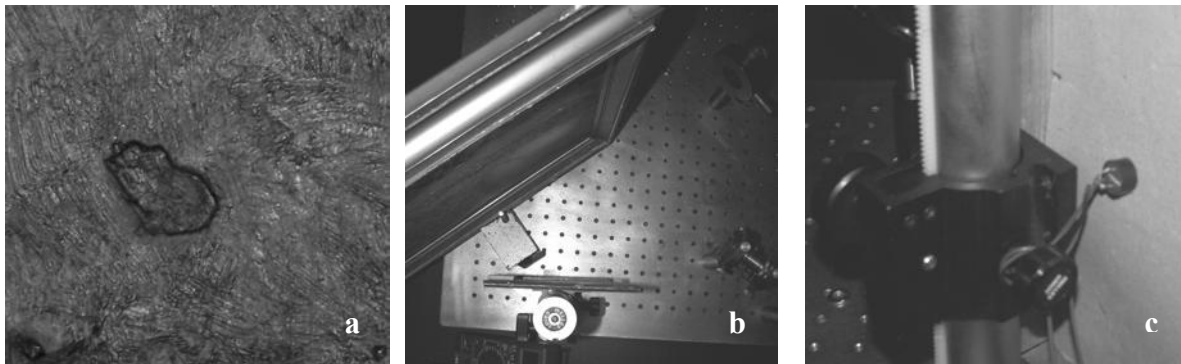


Fig. 10. (a) Detail of area under study. (b) Holographic scheme. (c) Detail of way to support a buzzer in the rear part.

By applying the technique explained above and using the 9.1 mA excitation in the buzzer, the holographic images of the Vercelli's paint were obtained. The first problem found was the low intensity of images of the paint probably caused by the high level of pollution in its surface and a low reflectivity of the oil paint layer to the 632.8 nm laser wavelength. To obtain useful holograms it was necessary to make more than eight attempts varying the intensity levels of the reference and object beams, the beam angles and exposure time. Finally the best hologram presents a clear pattern of fringes superimposed to a low quality image of the paint (Figure 11).

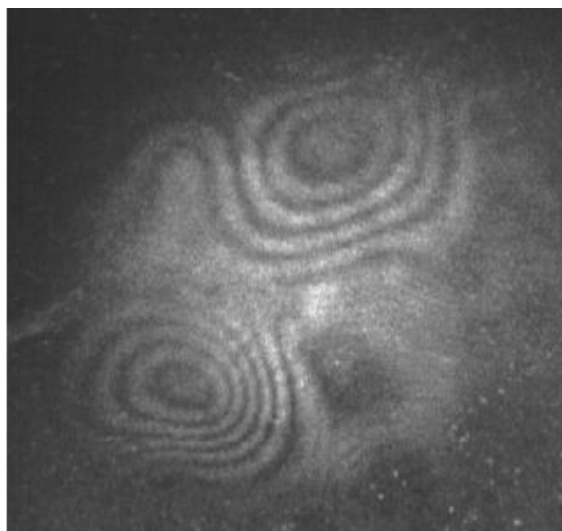


Fig. 11. Interferometric fringes of Vercelli's paint in the are under study: Current of excitation: 9.1 mA.

As it can be appreciated from Figure 12, the distribution of the fringes indicates two nodal zones localized up and down from the point of interest, however there are a total absence of fringes over such point. This situation seems to indicate a good level of cohesion between the paint layer and the wood. Both nodal zones present identical z range in similar areas divided for an imaginary line. The external fringes in both zones are connected which indicates the same z amplitude, in a similar manner of Figure 8a). This fringe pattern is usually associated to detachments; however such kind of damage can not be appreciated in a visual inspection of the paint.

5. CONCLUSIONS

In this work we present a NDT methodology based on double way-double exposure holographic interferometry for the analysis of artworks by means of sound excitation. For this purpose a specific device which is able to produce a localized sound wave excitation has been developed. The feasibility of our system to detect superficial cuts or cracks in a thin film or membrane which can simulate the behavior of a paint layer has been demonstrated. The technique has been applied to the analysis of oil on wood paint from Italian artist S. Vercelli and preliminary results are presented. These results show that it is possible to detect the defects on the paint by means of interferographic holography; however some problems, basically related to the low reflectivity of the paint surface diminish the quality of the holograms requiring further work to obtain satisfactory results.

REFERENCES

- [1] Asmus, J. F., "Non-divestment laser applications in art conservation", J. Cult. Heritage, 4, 289s–293s, (2003).
- [2] Caufield, H. J., "Handbook of Optical Holography", Academic Press, San Diego California, Chapter 10, (1979).
- [3] Tornari, V. "Laser interference-based techniques and applications in structural inspection of works of art", Anal. Bioanal. Chem, 387, 761-780, (2007).
- [4] http://www.hitpoint.tw/electronic/en/product/pk_pf_pl-series/pk-12n40pa.htm.

LA INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA COMO TÉCNICA DE ANÁLISIS NO DESTRUCTIVO PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS ESTRUCTURALES EN MATERIALES DE INTERÉS ARTÍSTICO Y/O ARQUEOLÓGICO

F. Vincitorio

Facultad Regional de Paraná, Universidad Técnica Nacional, Paraná, Entre Ríos, Argentina fabiolento@arnet.com.ar

A. Ramil

Centro de Investigaciones Tecnológicas, Universidade da Coruña, 15403 Ferrol aramil@cdf.udc.es

A.J.López

Centro de Investigaciones Tecnológicas, Universidade da Coruña, 15403 Ferrol ajlopez@cdf.udc.es

E. Saavedra

Centro de Investigaciones Tecnológicas, Universidade da Coruña, 15403 Ferrol esotero@cdf.udc.es

A. Yáñez

Centro de Investigaciones Tecnológicas, Universidade da Coruña, 15403 Ferrol ayanez@udc.es

RESUMEN

Las técnicas de diagnóstico estructural basadas en láser, aunque ampliamente utilizadas en el ámbito industrial, constituyen una herramienta relativamente novedosa en el ámbito del patrimonio cultural. El interés de estas técnicas, fundamentalmente las basadas en holografía, estriba en que permiten visualizar la integridad estructural de la pieza a partir de las deformaciones que experimenta en respuesta a las variaciones de las condiciones ambientales que se producen en su entorno. En particular la interferometría holográfica permite localizar de forma precisa las alteraciones estructurales invisibles que se están produciendo. Dichas alteraciones (grietas, desprendimientos, etc) ocurren fundamentalmente a nivel microscópico y su estudio requiere una resolución en la detección de los desplazamientos de la superficie del orden de unas pocas micras. Su gran sensibilidad, unida a su carácter no destructivo y al hecho de que las pruebas no afectan a la pieza, la hace muy atractiva en el campo museístico y patrimonial. En este trabajo se muestran los resultados obtenidos en nuestro laboratorio del análisis de una pintura al óleo sometida a excitación acústica. Los resultados obtenidos aunque preliminares pueden calificarse como prometedores y efectivos en el ámbito museístico y de conservación del patrimonio cultural.

ABSTRACT

Techniques based on holographic interferometry have achieved a mature state of non destructive testing applications in industry and nowadays they are rising as interesting and promising tools in the field of conservation practices; giving information about the condition of structural integration of artworks. In the present study conventional double exposure double way holographic technique based on holographic films was used to obtain an out of plain deformation pattern caused by a sound emitter in an oil painting which has suffered heavy structural damage. Optimization of the excitation sound wave characteristics (frequency and amplitude) and the adjustment and calibration of the experimental set up, in order to obtain precise information about the physical and mechanical integrity of localized points of the painting are reported.

Palabras Clave: NDT, Interferometría holográfica, excitación sonora, pintura al óleo

Keywords: NDT, Holographic Interferometry, sound wave excitation, artworks

Introducción

Las técnicas holográficas y sus aplicaciones al ensayo no destructivo de materiales (NDT) nacieron inmediatamente después del desarrollo del láser en 1962 y se desarrollaron ampliamente durante los años 70. En 1972 ante la amenaza de una gran inundación, se montó en Venecia un gran láser de rubí con el cual se obtuvieron in situ unos 50 hologramas de estatuas a tamaño real, con la idea de producir un archivo de referencia en el caso de que

las estatuas originales pudieran perderse. Este hecho constituye el primer antecedente del uso de la holografía en el ámbito de la conservación de obras de arte.

Las técnicas interferométricas permiten detectar, con un alto grado de precisión, posibles deformaciones de un objeto. En concreto, la interferometría holográfica se ha venido utilizando como técnica no destructiva para el estudio de las variaciones

dimensionales que un objeto (caso de una obra de arte) puede sufrir a consecuencia de las tensiones de tipo mecánico, térmico o de otra naturaleza a que está sometido.

El principio básico de esta aplicación de la holografía es el de registrar en secuencias temporales dos hologramas diferentes del mismo objeto, en la misma posición y sobre la misma placa. Si entre estos dos registros consecutivos se producen, por causa naturales o artificiales, modificaciones en las dimensiones del objeto, la interferencia entre los dos hologramas produce un típico patrón de franjas. Esta técnica recibe el nombre de holografía de doble exposición, ya que el mismo medio de registro (película holográfica) ha sido expuesta dos veces en tiempos sucesivos. Variando las condiciones de la exposición es posible obtener imágenes compuestas predominantemente de franjas o que contengan también la imagen real del objeto.

La técnica de la interferometría holográfica se encuentra en continuo desarrollo tanto en lo que concierne a las fuentes láser utilizadas como a los distintos tipos de experimento; presentando sin embargo en todos los casos como característica diferencial el tratarse de un método estrictamente no destructivo que no afecta al objeto estudiado.

El objetivo de la interferometría holográfica en el ámbito de la conservación suele ser la detección de distintos tipos de daños estructurales. Algunas causas de alteración localizadas (presencia de tensiones, desprendimiento de partes, etc.) pueden originar la aparición de deformaciones (en el rango micrométrico y submicrométrico) en el objeto que pueden ser registradas antes de que sean visibles mediante esta técnica; lo cual la convierte en una herramienta de gran importancia para el diagnóstico.

En el presente trabajo presentamos una metodología basada en la técnica de doble exposición utilizando una onda sonora como fuente de excitación del objeto, con el objetivo de su aplicación al análisis de pinturas.

El primer paso consistió en la puesta en marcha del dispositivo experimental adaptado al análisis de la pieza artística y el ajuste de los parámetros involucrados, principalmente relacionados con la técnica holográfica y con el nivel de sonido de la onda de excitación necesaria para generar en el objeto una deformación adecuada para producir hologramas útiles. La técnica se aplicó al estudio de una pintura del artista italiano S. Vercelli. La obra formaba parte de la serie "Pesce in Fiore" y fue pintado con la técnica de óleo sobre madera en torno a 1920. Debido a las malas condiciones sufridas por la pintura durante años de almacenamiento, la su-

perficie está cubierta con una gruesa capa de suciedad, destacándose además pequeños desprendimientos en algunas zonas de la superficie probablemente causados por golpes.

Experimental

Montaje experimental

El montaje experimental para obtener imágenes holográficas se esboza en la Figura 1. La técnica holográfica se basa en la utilización de un doble camino óptico. La luz emitida por el láser es dividida por medio de un beam-splitter en dos haces: haz de referencia y haz objeto, cada uno de ellos con el 50% de intensidad. Como ya hemos dicho, la doble exposición se refiere al uso de dos diferentes hologramas registrados en el mismo soporte (película, ccd, etc.). El primer holograma se obtiene cuando el objeto tiene un volumen V_1 y el segundo cuando tiene un volumen V_2 . En ambas exposiciones el haz de referencia es el mismo. Si la diferencia de camino óptico entre ambas exposiciones es del orden de varias longitudes de onda de la luz láser, el holograma resultante consiste en un patrón de interferencia superpuesto sobre la imagen del objeto.

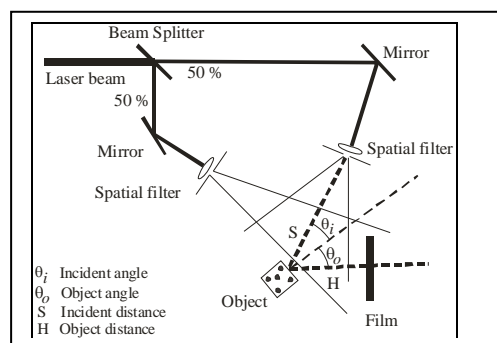


Fig. 1. Esquema de la técnica holográfica.

En este trabajo se utilizó una fuente láser de He-Ne con una potencia de 10 mW. El haz de referencia y el haz objeto se filtraron a fin de lograr la diferencia en la intensidad necesaria para conseguir la formación de las imágenes holográficas. El medio de registro fue la película holográfica Slavich PG-3 con una definición mayor de 3000 líneas/mm y se utilizó un revelador de cuatro etapas JD-2. Con el fin de producir una deformación localizada en el objeto de estudio se utilizó un pequeño zumbador HITPOINT INC, modelo PK-12N40PA. Su intensidad de la operación varía entre 1,5 y 15 mA. El zumbador emite sonido con una frecuencia de 4,1 kHz y un nivel sonoro de 80 dB a 5 mA a 86 dB a 9 mA. Todos los elementos ópticos, fuente de excitación y el objeto de estudio fueron situados sobre una mesa antivibratoria

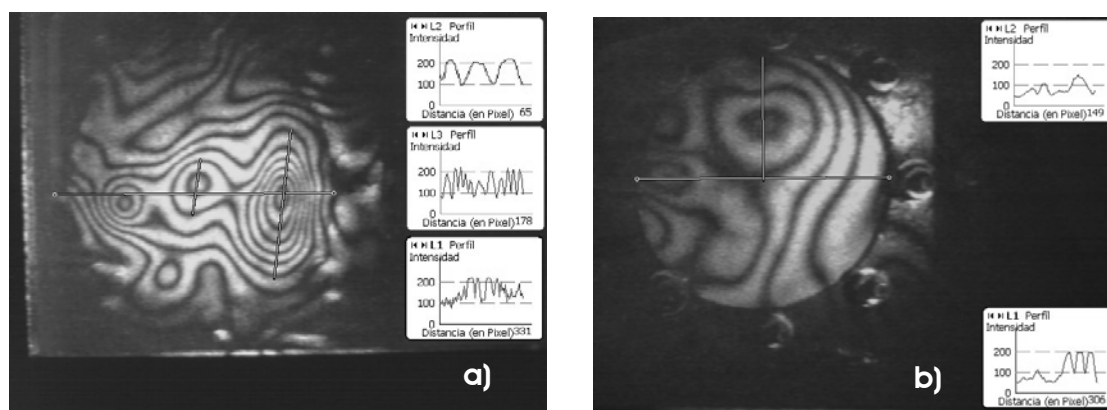


Fig.: 2. Hologramas obtenidos cuando se utiliza una intensidad de entrada de a) 9,1 mA y b) 4,6 mA.

- Ajuste de los parámetros experimentales

Con el fin de obtener hologramas útiles en términos de la visibilidad de las franjas es necesario un ajuste de las variables que afectan tanto a la excitación del material (amplitud de la onda sonora, corriente de entrada) como a las relacionadas con la técnica holográfica. Con este fin, se diseñó un dispositivo especial que contiene una membrana y un zumbador. Mediante el uso de este dispositivo se obtuvieron hologramas de la membrana excitada mecánicamente por el sonido emitido por el zumbador para diferentes valores de los parámetros implicados y de esta forma se optimizaron las condiciones experimentales.

En primer lugar se ajustó el tiempo óptimo de exposición para lograr la formación de las imágenes holográficas, que fue de 8 s para una única exposición. Esta alta exposición es necesaria dada la baja potencia de la fuente láser utilizada. La intensidad de alimentación del zumbador se ajustó con el fin de obtener un desplazamiento adecuado de la membrana. La Figura 2 muestra los hologramas obtenidos cuando se utiliza una intensidad de entrada de 9,1 mA y 4,6 mA.

En ambos casos, los hologramas muestran un patrón de franjas con nodos que se corresponden a los puntos donde se ha producido una deformación localizada en la dirección perpendicular a la membrana. Sin embargo, el holograma obtenido con 9,1 mA presenta una mejor definición que en el otro caso.

- Detección de defectos

En el campo de la conservación de obras de arte se pueden encontrar diferentes tipos de problemas relacionados con la integridad estructural tales como desprendimientos o grietas. Con la finalidad de evaluar la respuesta de nuestro sistema a estas situaciones hemos hecho un corte superficial en la membrana para simular una grieta. El holograma obtenido nos permitió detectar el defecto a través

de la ruptura de la continuidad en la pendiente en las franjas de interferencia, como se muestra en la Figura 3. En la imagen a) se aprecian dos zonas nodales, claramente definidas, ubicadas a cada lado del corte y un quiebro en la pendiente de las franjas exteriores. En la imagen b), en la cual se han variado los ángulos de observación, no se aprecian las zonas nodales pero sí el quiebro en la pendiente. En ambos casos, la observación visual del holograma permite detectar la posición de la grieta.

Caso práctico: Aplicación al análisis estructural de una pintura al óleo

Hemos aplicado la interferometría holográfica de doble exposición mediante excitación sonora al análisis de la integridad estructural del óleo de S. Vercelli (Figura 4). Para su análisis se seleccionó una zona circular de aproximadamente 10 cm de radio, en la cual se destaca un grueso apilamiento de pintura de aproximadamente 1,5 cm de diámetro. El óleo se fijó a la mesa antivibratoria mediante imanes extraíbles en la base y columnas de hierro con anclajes a fin de evitar el desplazamiento vertical. El área de estudio se encuentra enfrente de la película holográfica. El zumbador está pegado con adhesivo de contacto a la parte trasera de la pintura.

Mediante la aplicación de la técnica explicada anteriormente y utilizando una corriente de 9,1 mA de excitación en el timbre, se obtuvieron las imágenes holográficas de la pintura de Vercelli. El primer problema encontrado fue la baja intensidad de las imágenes de la pintura, probablemente causado por el alto nivel de contaminación en la superficie y la baja reflectividad de la capa de pintura al óleo a la longitud de onda de 632,8 nm del láser. Para obtener hologramas útiles para el análisis fue necesario hacer una decena de pruebas variando la intensidad relativa de los haces de referencia y objeto, los ángulos y el tiempo de exposición. Por último el mejor holograma obtenido presenta un claro patrón de franjas superpuestas a una imagen de baja calidad de la pintura (Figura 5). Como puede apreciarse el patrón de interferencia muestra dos

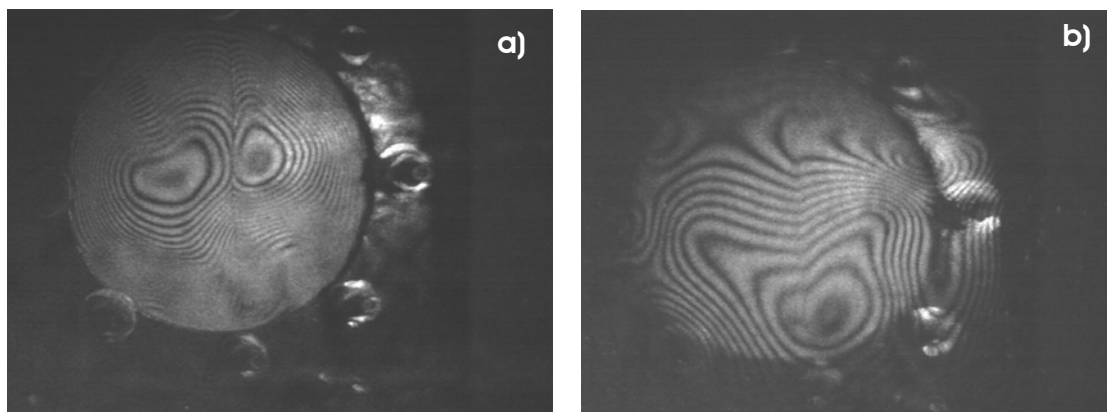


Fig.: 3. En la imagen se aprecian dos zonas nodales, claramente definidas, en a), ubicadas a cada lado del corte y un quiebro en la pendiente de las franjas exteriores. En la imagen b) se han variado los ángulos de observación,

zonas nodales localizadas arriba y hacia abajo del punto de interés, sin embargo hay una ausencia total de franjas sobre ese punto. Esta situación parece indicar un buen nivel de cohesión entre las capas de pintura y la madera del soporte. Ambas zonas nodales presentan un desplazamiento vertical idéntico. Las líneas periféricas en ambas zonas nodales se conectan lo cual indica la misma amplitud del desplazamiento vertical.



Figura 4. pintura del artista italiano S. Vercelli. La obra formaba parte de la serie "Pesche in Fiore"

la interferometría holográfica; sin embargo algunos problemas, básicamente relacionados con la baja reflectividad de la superficie de la pintura disminuyen la calidad de los hologramas. Se hace necesario por tanto continuar profundizando para obtener resultados satisfactorios.



Figura 5. Holograma del área seleccionada de la pintura Vercelli mostrando un patrón de interferencia característico.

Conclusiones

En este trabajo presentamos una metodología de análisis no destructivo (NDT) basada en la técnica de interferometría holográfica de doble exposición para el análisis de obras de arte con excitación mediante onda sonora. Con este fin se ha diseñado un dispositivo específico que es capaz de producir una onda sonora para la excitación localizada del objeto. La viabilidad de nuestro sistema para detectar grietas o cortes superficiales en una fina película o membrana, que puede simular el comportamiento de una capa de pintura ha sido demostrada.

La técnica se ha aplicado al análisis de la pintura de óleo sobre madera del artista italiano S. Vercelli y se han presentado los resultados preliminares obtenidos. Estos resultados muestran que es posible detectar los defectos en la pintura a través de

Referencias

- Asmus, J. F., et al., Holography in the conservation of statuary, *Studies in Conservation* 18 (1973) 49-63.
- Caufield, H. J., "Handbook of Optical Holography", Academic Press, San Diego California, Chapter 10, (1979).
- Tornari, V. Laser interference-based techniques and applications in structural inspection of works of art, *Anal. Bioanal. Chem.*, 387 (2007) 761-780.
- Vincitorio, F. et al. Ensayos por interferometría holográfica de materiales tratados con láser de potencia, IV Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos (END) Buenos Aires – Octubre 2007

Del Conocimiento de Óptica, el Láser y la Holografía a la Fábrica.

Autores:

**Vincitorio, Fabio/ Spector, Mario/ Ramil, Rego Alberto/ Lopez Díaz, Ana Jesús/
Yáñez Casal, Armando**

Facultad Regional Paraná - Universidad Tecnológica Nacional

Escuela Politécnica Superior - Universidad de La Coruña

Correo Electrónico: cyt@frp.utn.edu.ar, aramil@cdf.udc.es

Resumen

La física, la óptica y la holografía son conocidas como actividades cuyo ámbito natural son laboratorios de investigación en los cuales el objetivo se centra en la generación de conocimientos. Por su parte la utilización del láser ha tenido y seguirá tenido un gran espectro de aplicaciones tanto científicas como industriales.

La combinación de áreas temáticas, de ciencias básicas como la física, la óptica aplicada, la holografía, el láser de potencia y el conocimiento de materiales se fusionaron en este trabajo para trasladar conocimientos en un área industrial en la cual habitualmente existen pocos puntos de contacto con la investigación.

La comparación sobre los sistemas de corte aplicados en forma industrial con la posibilidad del corte con láser de alta potencia fueron estudiados por medio del diagnóstico mediante interferometría holográfica y el estudio particular de los materiales.

Como resultado los conocimientos obtenidos fueron volcados a la empresa solicitante de los estudios.

Palabras Clave: ciencia, industria, transferencia

DEL CONOCIMIENTO DE OPTICA, EL LÁSER Y LA HOLOGRAFÍA A LA FABRICA.

Resumen

La física, la óptica y la holografía son conocidas como actividades cuyo ámbito natural son laboratorios de investigación en los cuales el objetivo se centra en la generación de conocimientos. Por su parte la utilización del láser ha tenido y seguirá tenido un gran espectro de aplicaciones tanto científicas como industriales.

La combinación de áreas temáticas, de ciencias básicas como la física, la óptica aplicada, la holografía, el láser de potencia y el conocimiento de materiales se fusionaron en este trabajo para trasladar conocimientos en un área industrial en la cual habitualmente existen pocos puntos de contacto con la investigación.

La comparación sobre los sistemas de corte aplicados en forma industrial con la posibilidad del corte con láser de alta potencia fueron estudiados por medio del diagnóstico mediante interferometría holográfica y el estudio particular de los materiales.

Como resultado los conocimientos obtenidos fueron volcados a la empresa solicitante de los estudios.

Palabras claves

Ciencia, industria, transferencia.

1. Introducción

Cuando hablamos de láser y de sus aplicaciones lo primero que surge en nuestra mente es pensar en laboratorios de alta tecnología ubicados en algún subsuelo de una importante universidad o centro de investigación. Sin embargo el láser y su tecnología ha sabido transponer desde su creación los límites del laboratorio para constituirse en una verdadera herramienta industrial. Hoy es posible encontrar en diferentes ámbitos productivos este tipo de tecnología.

Por su parte la holografía despierta una idea muy distinta, nos recuerda esas películas de ciencia ficción donde el protagonista con su reloj pulsera es capaz de generar múltiples imágenes de si mismo para engañar a su adversario.

Más allá de todas las ideas que podamos generar en nuestras mentes sobre esta tecnología con profundas raíces en la física, nos encontramos con una realidad en la cual es posible trascender la frontera, muchas veces infranqueable, entre el laboratorio y la fábrica de producción masiva.

El láser de potencia como herramienta de maquinado de piezas metálicas y la holografía como método de ensayo no destructivo fueron utilizadas para evaluar los procesos de corte

de aceros al silicio usados en la industria de los equipos auxiliares de iluminación. Para esto se trabajó en conjunción entre el Centro de Aplicaciones Industriales del Láser de Potencia de la Universidad de la Coruña (España), el Laboratorio de Holografía de la Facultad Regional Paraná y la Empresa Italvia –ELT Argentina.

1.1 Descripción del proceso productivo.

Los equipos auxiliares de iluminación para lámparas de descarga, están compuestos por diferentes elementos, de los cuales los de mayor importancia son el núcleo y el bobinado. El bobinado no es mas que un arroyamiento de alambre de cobre mientras que el núcleo se encuentra conformado por sucesivas capas de láminas de acero al silicio que habitualmente son cortadas con formas de “E” e “I” para su posterior ensamblaje.

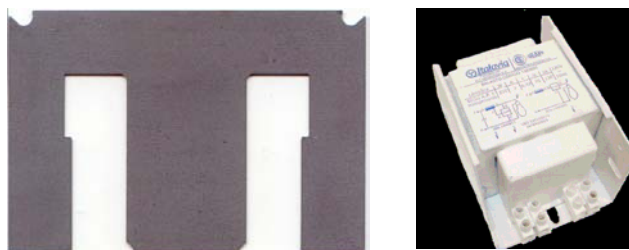


Figura 1 – Pieza E y equipo auxiliar para lámparas de descarga terminado, gentileza de Italvia – ELT Argentina.

Las piezas “E” son cortadas por guillotinas especiales de alta velocidad denominadas prensas de corte rápido, en las cuales una matriz determina la forma que se le quiere dar al fleje laminado que es introducido a dicha máquina. En este proceso intervienen una multiplicidad de variables las cuales afectan en diferente forma el producto terminado. La principal de estas es el desgaste que va sufriendo la matriz con el uso, lo que genera entre otras cosas un mal factor de apilado y por ende aumento de las pérdidas, de las vibraciones y de las emisiones sonoras en el producto terminado.

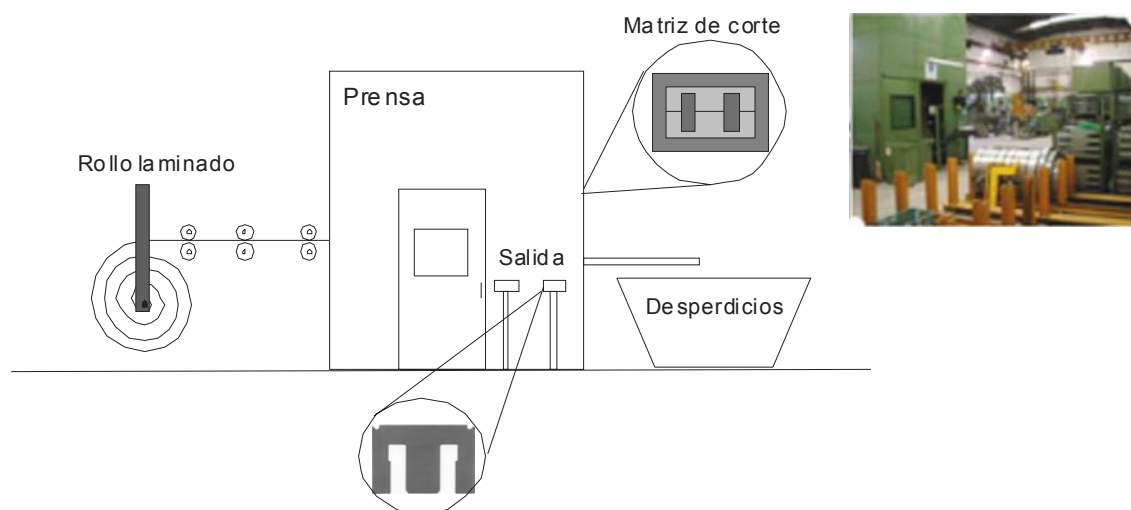


Figura 2 – esquema y fotografía de la prensa de corte rápido utilizada en la línea de producción, gentileza de Italvia – ELT Argentina.

La prensa de corte rápido con capacidad de 1700 golpes por minuto es capaz de producir, en función de la matriz, hasta 3400 piezas por minuto. El fleje laminado que ingresa por un extremo es transformado en las piezas cortadas, las cuales emergen por dos bocas

diferentes y los desperdicios del corte son enviados a la fundición para su posterior reciclado.

Las piezas cortadas son trasladadas a la línea de montaje automatizada donde las agrupan según el modelo de equipo y ubica el bobinado realizado sobre el respectivo carrete entre las partes del núcleo. Posteriormente se fija mecánicamente todo el conjunto y se procede al proceso de pintura y aislamiento en autoclave.

En todo el proceso de producción son realizadas diferentes pruebas que constituyen un control de calidad por etapas.

1.2 Objetivos.

Habiendo definido brevemente el proceso de producción podemos enunciar los objetivos propuestos, de común acuerdo con el fabricante.

- Evaluar la calidad del corte con prensa utilizando como herramienta la interferometría holográfica.
- Contrastar el proceso de corte del hierro silicio mediante prensa de corte rápido y el láser de CO₂.
- Evaluar la posibilidad de aplicación del láser de CO₂ al proceso de fabricación.

1.3 Conceptos sobre ensayos no destructivos por interferometría holográfica.

Básicamente los hologramas pueden ser construidos mediante dos técnicas generales, los hologramas de transmisión y los hologramas de reflexión (su calificación depende de cómo es la observación y no su construcción). El primero de los casos es el caso particular de interés ya que es el que permite obtener hologramas interferométricos usados habitualmente en los NDT.

Un esquema general de implementación puede verse en la figura 3, en el cual la luz proveniente del láser es dividida mediante un divisor de haz en dos caminos ópticos, que en la práctica no deberán diferenciarse en más de una distancia equivalente a la longitud del tubo de láser usado, esto para evitar pérdidas de coherencia. Cada haz es

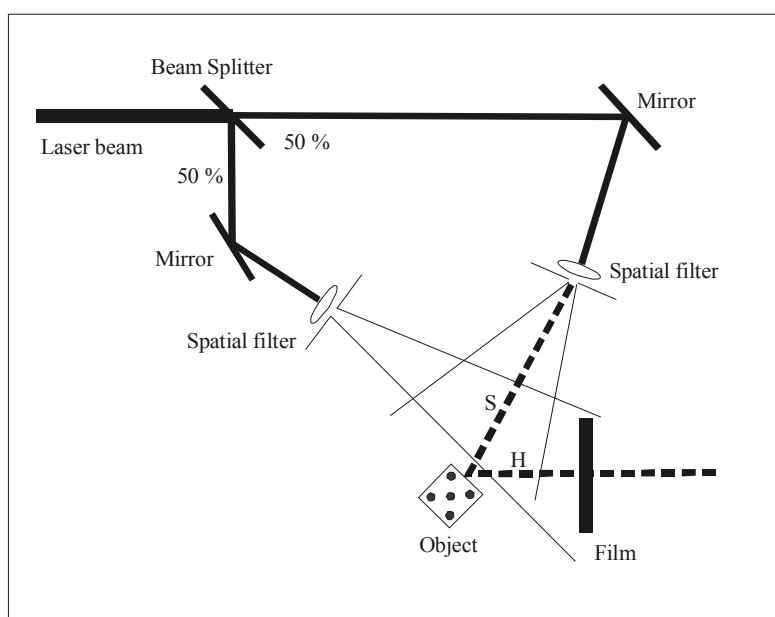


Fig. 3 Esquema aplicado para lograr hologramas de transmisión de doble camino óptico.

direccionado mediante espejos hacia sendos filtros espaciales los cuales expandirán los respectivos haces que posteriormente incidirán sobre el objeto y la película respectivamente. Aquí debemos recordar que el haz de referencia deberá ser de mayor intensidad que el haz reflejado por el objeto por lo cual dos opciones son posibles, usar un divisor de haz no simétrico o usar filtros espaciales con diferentes pin-holes. De esta manera se debe buscar las relaciones de intensidad necesarias para lograr la imagen holográfica. Es normal considerar que el haz de referencia deberá ser unas diez veces mayor al proveniente del objeto.

$$I_R \cong 10 \cdot I_O$$

A partir de esto es posible lograr imágenes de objetos particulares pero que no aporta mas información que la relacionada a sus dimensiones. Si quisiéramos analizar el comportamiento dinámico del objeto, cuando este es sujeto de excitaciones inducidas, deberemos hacerlo mediante la técnica de doble exposición. Básicamente esta consiste en superponer dos hologramas del mismo cuerpo pero en dos condiciones diferentes, induciendo en una de ellas una deformación que deberá ser en todos los casos del orden de unas cuantas longitudes de onda. Por el contrario si las deformaciones fueran de magnitudes mucho mayores a la longitud de onda y hasta macroscópicas, estas pueden ser registradas mediante la misma técnica pero la información aportada será diferente. En el primer caso sobre la imagen resultante observaremos la superposición de franjas oscuras y claras las cuales nos indican la magnitud y la forma de la deformación sobre el objeto. En el segundo caso observaremos dos imágenes diferentes del mismo cuerpo, se podría decir que vemos como una sobra, la cual no es mas que la imagen del objeto con mayores o menores dimensiones dependiendo del caso.

Matemáticamente si queremos definir la formación de la imagen de un holograma de doble exposición con variación de las dimensiones del cuerpo corresponde el siguiente planteo.

Cuando el cuerpo O es iluminado por una fuente de luz coherente un punto particular P sobre la superficie de este dispersa luz en todas direcciones, interesándonos una dirección particular que se dirige hacia el medio de registro. La luz dispersada llega al film F a través del camino óptico H. El haz de referencia $U_r(x,y)$ llega al film mediante el camino óptico de referencia. Si el camino seguido por la luz proveniente del objeto cambia levemente su camino óptico de tal manera que la diferencia sea pequeña entre la primera y la segunda exposición, podemos definir un nuevo frente de onda correspondiente a una nueva condición. Es así que si $O_1(x,y)$ se convierte en $O_2(x,y)$ la imagen final registrada sobre el holograma será una combinación de $U_r(x,y)$, $U_1(x,y)$ y $U_2(x,y)$.

Cuando el holograma final es reconstruido, este estará compuesto por la combinación de dos semi – hologramas sobre los cuales aparecerá un patrón de interferencia.

$$O_1(x, y) = a(x, y) \cdot e^{[-j\phi(x,y)]} \quad (\text{Ec. 1})$$

La ecuación 5 representa la luz proveniente del punto P del objeto antes de introducir un cambio en el volumen del mismo mediante la perturbación. El ángulo $\phi(x,y)$ representa la información asociada a la fase de la onda dependiente de las características del objeto en el punto P.

$$O_2(x, y) = a(x, y) \cdot e^{\{-j[\phi(x,y)+\Delta\phi(x,y)]\}} \quad (\text{Ec. 2})$$

La Ecuación 2 representa el frente de onda proveniente del punto P luego de haberse producido la deformación del cuerpo, donde $\Delta\phi(x,y)$ representa el cambio en la fase producido por el cambio en el camino óptico debido al cambio en el volumen del objeto. La formación final de la imagen dependerá de la combinación de los tres frentes de onda sobre la película, expresado por.

$$I(x, y) = |U_1(x, y) + U_2(x, y)|^2 = |2 \cdot \alpha(x, y)|^2 \{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde $2\alpha^2(x,y)$ es la amplitud del frente de onda asociado a la imagen del objeto y $\Delta\phi(x,y)$ es la diferencia de fase debida al cambio de camino óptico entre ambas exposiciones. Puede observarse que la imagen final queda modulada por el coseno del cambio total de fase lo que originará existan zonas de franjas oscuras y zonas claras sobre la imagen final del objeto.

Así cada una de estas franjas está representando un cambio de fase 180° en el camino óptico total.

1.4 Conceptos generales sobre el corte de materiales con láser de potencia.

Una de las primeras aplicaciones que se le dio a la tecnología del láser fue la de corte de materiales, hoy por hoy no existe material que no haya sido ensayado por esta tecnología. Sin embargo nuevas aplicaciones van surgiendo más allá de tratarse de una aplicación que ha alcanzado su grado de madurez científica y se encuentra hoy en su apogeo industrial. Para el corte de materiales así como el perforado es necesario optimizar parámetros particulares como la densidad de energía o potencia, la velocidad de avance, la longitud de onda y por ende el tipo de láser, el gas de aporte utilizado para cada tipo de material.

En general para los procesos de corte suelen utilizarse potencias que van desde los cientos de watt a potencias del orden del kilowatt. Por excelencia el láser usado es el láser de CO_2 , por sus características y tecnología robusta. Actualmente el láser de Nd-Yag ha ido remplazando a este último a partir de la posibilidad de acoplamiento por fibra óptica.

En todos los procesos de corte es fundamental determinar la potencia necesaria y la velocidad de avance del cabezal, muchas veces limitada por las características del material y la longitud de onda disponible.

El corte de metales, en particular los metales ferrosos, es tal vez el área de mayor desarrollo en las aplicaciones del láser de potencia, en gran medida esto se debe a la posibilidad de usar oxígeno como gas de aporte el cual mejora los parámetros de corte debido a la reacción exotérmica de oxidación que se genera al reaccionar con el Fe.

Los aceros al silicio son fabricados para la industria de los transformadores existiendo dos tipos diferentes de laminación, las de grano aleatorio y las de grano orientado. Las mismas son usadas para núcleos de pequeña potencia en el primer caso y para núcleos de alta potencia en el segundo caso.

En los núcleos de baja potencia los efectos del corte no resultan ser, a partir de la información disponible, relevantes desde el punto de vista de los aspectos magnéticos y constructivos de los núcleos, sin embargo para los núcleos de gran potencia como el caso de los transformadores de distribución de media y alta tensión los fabricantes saben, por medio de técnicas termográficas, que los puntos de mayor pérdida se encuentra en la zona ligada al corte. Actualmente en la mayor parte de los procesos industriales el corte se realiza por medio de sizalla la cual entrega características diferentes al corte resultante, existiendo en algunos casos el doblado de la chapa en la zona de corte, esto último debido a que las cuchillas se van desafilando con el aumento de las operaciones. Una razón mas para indagar sobre el uso del láser en estas aplicaciones lo encontramos en relación al costo

de reemplazo de las cuchillas las cuales deben ser reemplazadas dos a tres veces al año dependiendo del uso que se les de costando hasta un 3 % del costo total de la herramienta.

2. Operatoria

2.1 Aplicación del láser de CO₂ al corte de núcleos.

El proceso de corte de aceros con bajo contenido en carbono tiene una ventana de operación amplia dentro de la cual es posible obtener cortes de buena calidad. Los problemas aparecen cuando se quieren alcanzar velocidades de corte elevadas. Lo que se suele hacer en estos casos es determinar esa máxima velocidad de corte y trabajar a velocidades menores en un 10 ó 20% menores. Esta práctica asegura que la máquina de corte trabaja bien dentro de estos límites y queda por lo tanto insensible a cambios menores en otros parámetros del proceso. A partir de aquí se puede decir que el corte por láser de aceros de bajo contenido en carbono es fiable si se presta atención a los parámetros citados, de acuerdo con el procedimiento establecido en el párrafo anterior.

Al hierro se le añaden elementos aleantes para conseguir materiales con una variedad de propiedades. Las propiedades que se requieren son: dureza, tenacidad, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste y características magnéticas específicas. Las aleaciones de hierro se han desarrollado para satisfacer cada uno de estos requisitos individualmente y en varias combinaciones. Por ejemplo, si se añade una mayor proporción de carbono (hasta un 1%) y se efectúa el ciclo térmico correspondiente se adquieren interesantes propiedades de dureza y resistencia al desgaste. Los aceros inoxidable llegan a tener elementos aleantes por encima del 30%, estos elementos aleantes y su concentración tienen efectos diferentes en el proceso de corte por láser. Los aceros inoxidable fueron desarrollados para resistir la corrosión. La presencia de cromo es el principal elemento frente a la resistencia a la corrosión y a la vez es el material que más actúa en contra de la eficiencia del proceso de corte. El óxido de cromo es una barrera que impermeabiliza al material. Todos los aceros inoxidable contienen más de un 10% de cromo y otros elementos. Hay cuatro tipos de aceros inoxidable que son los austeníticos, los ferríticos los duplex y los martensíticos.

El mecanismo de corte de los aceros inoxidable es prácticamente el mismo que el caso de los aceros de bajo contenido en carbono. La diferencia está en que el proceso de oxidación que contribuye a proporcionar más energía al proceso no es tan eficiente en el caso del acero inoxidable. Las razones están en que el óxido de cromo actúa como barrera para la penetración del calor, el chorro de gas arranca esta capa lo que permite el flujo de calor hacia el interior del material. Asimismo la tensión superficial del óxido de cromo es mayor que la del óxido de hierro que se produce en el corte de aceros de bajo contenido en carbono.

La adición de una pequeña cantidad de silicio (4%) al acero mejora sus propiedades en aplicaciones eléctricas tales como transformadores o motores. El silicio colabora en la reducción de las corrientes parásitas gracias a que eleva la resistividad por un factor cuatro. Otro de los efectos que produce el silicio es la resistencia a la oxidación a alta temperatura. No sorprende, entonces que el silicio tenga un efecto negativo en el proceso de corte (comparado con los aceros poco aleados y de bajo contenido en carbono) lo que da lugar a bajas velocidades de corte junto con cierta rebaba. Las razones por las cuales ocurre esto no están del todo claras, pero aparentemente la tensión superficial aumenta en la zona cortada lo que de alguna manera frustra la siempre deseada oxidación del hierro. Una posible razón para esto es el hecho de que el dióxido de silicio y de óxido de silicio hacer que se forman durante el corte tienen densidades mucho menores que los óxidos de hierro.

Es probable que estos óxidos de silicio formen una capa superficial en la zona fundida que afecta a la tensión superficial y a la cinética de la oxidación. Tal y como se muestra en la figura 4. La presencia de este efecto no es deseable en absoluto, a veces puede evitarse utilizando un haz pulsado o chorros de gas auxiliares procesos mencionados en la bibliografía relacionada.

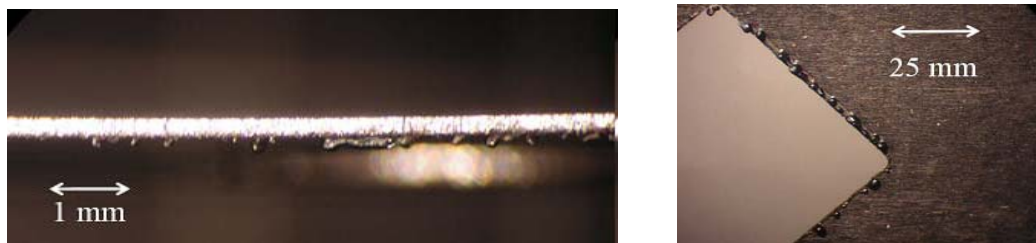


Figura 4 - Piezas de acero con contenido en Si cortadas con láser, se aprecian las rebabas no deseadas.

En el proceso de mejora del corte de las chapas de hierro silicio, se utilizó el láser de CO₂ en una potencia de 400 [W] pero usando como gas de trabajo nitrógeno para evitar los efectos asociados a la resistencia a la oxidación que presenta el silicio, encontrados en etapas anteriores.

Como resultado del corte se pueden observar la presencia de rebabas las cuales se desprenden fácilmente ejerciendo una leve presión sobre ellas ya sea en forma directa con la mano o bien con el uso un filo. **La presencia de las mismas hace que su aplicación a un proceso industrial implique una nueva etapa en la cadena de producción.**

De la observación de las piezas, cortadas ya con la forma final del núcleo, no se notan zonas de afectación térmica importante salvo en los extremos superiores de la pieza donde existe una curvatura en el corte de dimensiones muy reducidas.

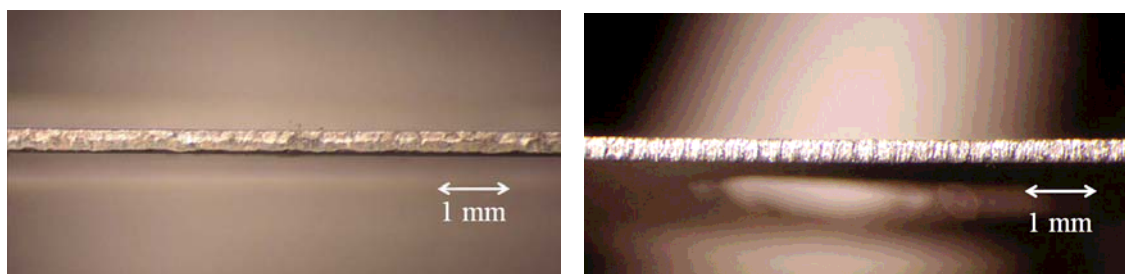


Figura 5 - Detalle comparativo del corte resultante con prensa y con láser de CO₂

El análisis de la microdureza demuestra un comportamiento más homogéneo de la muestra cortada con láser que el de la muestra cortada con prensa, encontrándose que para zonas cercanas a la zona de corte con sizalla el borde presenta un punto de máxima dureza de 245 HV decreciendo luego a 148 HV tal como puede verse en la figura 6. En función de esto puede verse que la estructura final de la pieza resulta mucho más homogénea y por lo tanto con menores probabilidades de presentar tensiones residuales por efectos del corte.

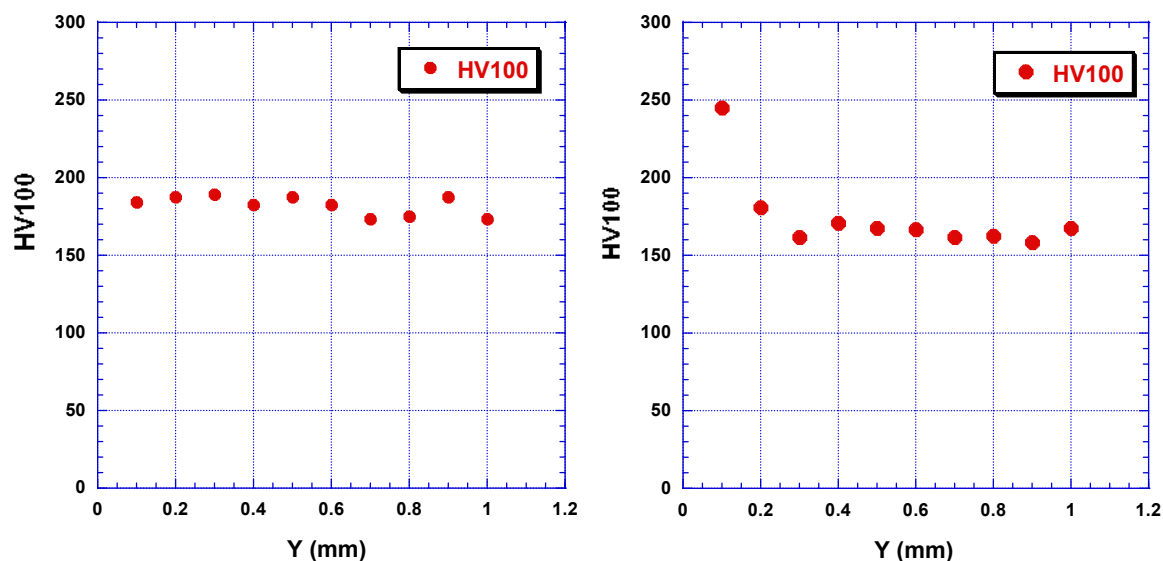


Figura 6 - Microdurezas de una sección del corte: a la izquierda la pieza cortada con láser. A la derecha la cortada en prensa de corte rápido.

2.2 Análisis comparativo por interferometría holográfica de las piezas cortadas por prensa de corte rápido y las cortadas con láser de CO₂.

2.2.1 Procedimiento.

La utilización de la técnica convencional de interferometría holográfica de doble exposición, usando la variación térmica del objeto, es la base de los ensayos realizados. Para su desarrollo se utilizó láser de He-Ne de 632,8 nm de 10 mW sobre un esquema de doble haz, doblemente filtrado con filtros espaciales de 15 μm para el haz del objeto y 5 μm para el haz de referencia. La ubicación del objeto respecto de la película es paralela con el fin de lograr en la imagen la superposición directa de las franjas sobre el objeto durante la observación del holograma resultante. La película usada es de soporte plástico Slavich PFG-01 con tiempos de exposición de 4 s por cada semiexposición parcial. Los procedimientos de revelado son convencionales de 4 pasos con tiempos de revelado de 4 m y de blanqueo de 1 m.

El material con el cual se fabrican las piezas E es hierro silicio, con un 2,5 a 3 % de silicio laminado y proveído en rollos.

La primera serie bajo estudio se realizó sobre **muestras obtenidas de la línea de producción** de una fábrica de equipos auxiliares de iluminación, destinados a lámparas de sodio de 70 W, en la cual en la etapa de corte se utiliza una prensa de corte rápido. Las muestras fueron seleccionadas aleatoriamente del par bocas de salida existentes en la máquina.

La segunda serie se realizó sobre muestras cortadas con láser de CO₂, sobre material obtenido **del rollo de alimentación de la prensa de corte rápido**. El láser de funcionamiento continuo fue regulado a una potencia de 400 W, con una velocidad de corte de 2 m/m y utilizando como gas de aporte nitrógeno.

2.2.2 Análisis de partes E cortadas con prensa

Para la muestra catalogada como n° 1 se realizaron un total de 3 hologramas variando los intervalos de temperatura. El primer holograma de la serie fue realizado teniendo en cuenta intervalos de temperatura de 4 °C tomando como extremos 40 °C para la primera semiexposición y 36 °C para la segunda semiexposición. La toma de temperatura se realiza con una termocupla de rango k, con instrumento digital Metrix Ascy II 5390, en un punto considerado de referencia.

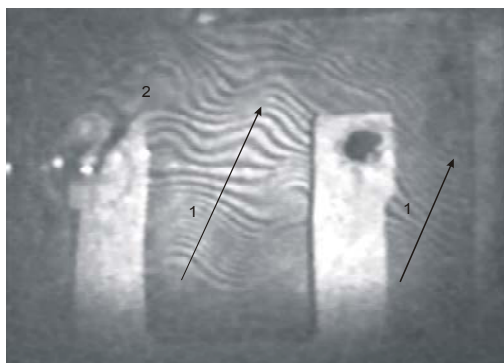


Figura 7. Holograma del núcleo E muestra 1, Δt de 4 °C.

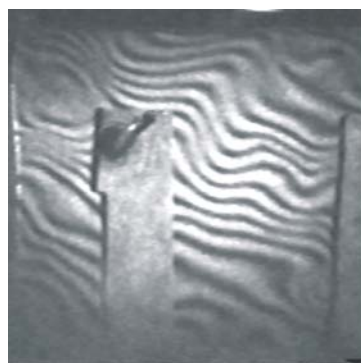


Figura 8. Holograma del núcleo E muestra 1, Δt de 2 °C.

En la figura 7 puede observarse la imagen fotográfica resultante de la imagen provista por el holograma, con un ángulo de observación perpendicular al plano de la placa el cual es a la vez paralelo al plano del objeto, tanto en vertical como en horizontal.

El diagrama de franjas resultante en la zona central y lateral derecha (1) muestra una distribución casi homogénea de las mismas con un sentido de orientación vertical respecto del plano de la pieza pero encontrándose juntas debido a un intervalo de temperaturas elevado. No se observan deformaciones localizadas que indicaran tensiones residuales.

La figura 8, muestra la imagen fotográfica del holograma resultante, de la misma muestra pero para un intervalo de temperaturas menor, en este caso 2 °C, ubicando la primera semiexposición a 30° C y la segunda a los 28 °C. Nuevamente puede observarse la ausencia de franjas hiperbólicas o concéntricas que indiquen deformaciones localizadas.

En la muestra catalogada como muestra 2, se realiza una serie de 5 hologramas en diferentes intervalos de temperatura encontrándose un comportamiento diferente al presente en la muestra 1. En este caso la información mas significativa es aportada por dos de los hologramas, el correspondiente a una variación térmica de 5 °C en el cual si bien las franjas pueden observarse notablemente juntas debido al intervalo de temperatura (Fig. 9) pueden observarse ordenamientos hiperbólicos de las franjas sobre el lateral superior izquierdo. En la zona indicada con el número 2 sobre la figura 9 puede observarse una zona de poca deformación respecto a las franjas cercanas que la circundan. Estos ordenamientos son indicativos de una deformación localizada fuera del plano.

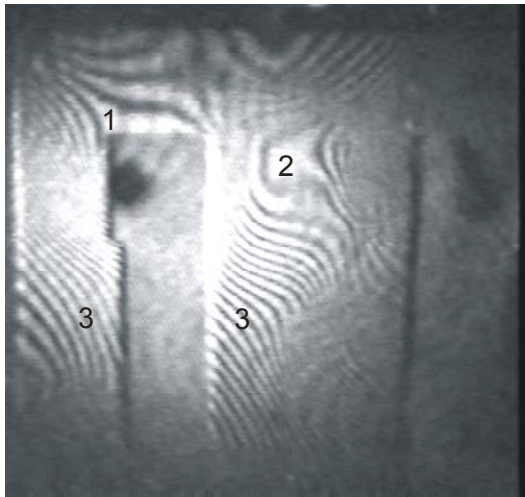


Figura 9. Holograma del núcleo E muestra 2, Δt de 5 ° C.

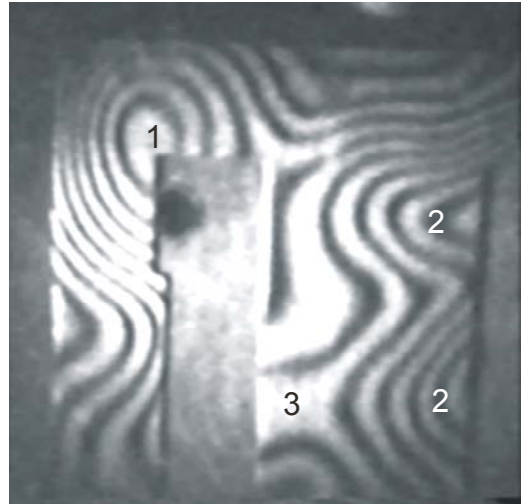


Figura 10. Holograma del núcleo E muestra 2, Δt de 2 ° C.

En la figura 10 puede observarse la imagen del holograma resultante para 2° C de variación térmica pero con un ángulo de observación de 40° respecto de la perpendicular al plano del objeto y la película. La variación en el ángulo de observación permite magnificar el ordenamiento de las franjas que indican deformaciones fuera del plano, si el ángulo de observación fuera igual al de iluminación del objeto solo se registrarían estas. La imagen resultante muestra un claro ordenamiento que indica deformaciones fuera del plano en las zonas indicadas como 1, 2 y 3. La zona 1 muestra que el centro de la deformación fuera del plano se sitúa en el ángulo interior de la de pieza, fenómeno que puede ser asociado a tensiones residuales originadas en el corte.

Ensayos posteriores sobre nuevas muestras indican una similitud de resultados, es decir piezas de un comportamiento homogéneo en su distribución de franjas y piezas a las cuales puede considerárselas tensionadas.

Realizada una nueva búsqueda de muestras en la planta se nos informa que cada boca corresponde a una matriz diferente y que las matrices presentan diferentes desgastes en iguales ciclos de trabajo siendo esto una justificación válida para las diferencias encontradas.

2.2.3 Análisis de las piezas cortadas con láser de CO₂

El primer holograma presentado corresponde a la muestra catalogada como 1-B, el cual fue realizado tomando intervalos de temperatura de 3° C siendo los extremos 29° C para la

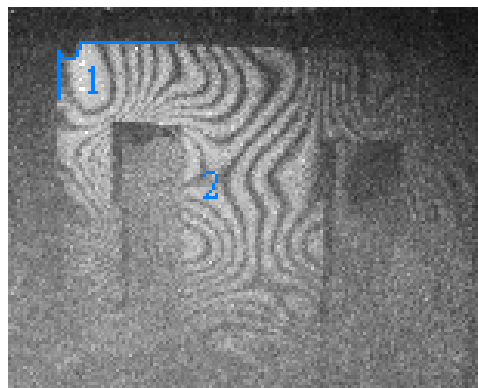


Fig. 11. Muestra 1-B, Δt de 2 ° C, corte con láser de CO₂ - 400 Wcc

primera semiexposición y 26° C para la segunda semiexposición.

En la figura 11 puede observarse la imagen fotográfica resultante de la imagen provista por el holograma, con un ángulo de observación de 30 ° respecto de la perpendicular al plano de la placa.

En el holograma resultante pueden observarse dos zonas particularmente interesantes, por un lado la zona indicada como 1 la cual muestra una franja cerrada sobre si misma y siguiendo la forma de la pieza en ese extremo. Con línea azul se ha resaltado la forma real del objeto y puede observarse como las franjas rodean el extremo superior izquierdo.

Esta zona debido al corte que se debe realizar por la morfología del objeto es la zona de mayor afectación térmica del cuerpo dado que el láser debe realizar una trayectoria circular de un radio muy pequeño. Queda claro que esta zona de afectación térmica condiciona el comportamiento de la pieza a la dilatación. En función de la distribución de las franjas puede definirse que la zona 1 presenta una dilatación diferente del resto de la “E” en la cual se nota uniformidad .

La zona 2 presenta cierta similitud en la distribución de franjas con las observadas para la muestra 2 de la figura 8.

En la muestra catalogada como muestra 2-B, se observa un comportamiento ante la dilatación más uniforme, al ser observado con un ángulo de 40° respecto de la horizontal, observándose deformación alineal en la zona de afectación térmica, pero una notable uniformidad en la rama central de la parte E del núcleo. El intervalo de temperatura tomado fue de 2° C.

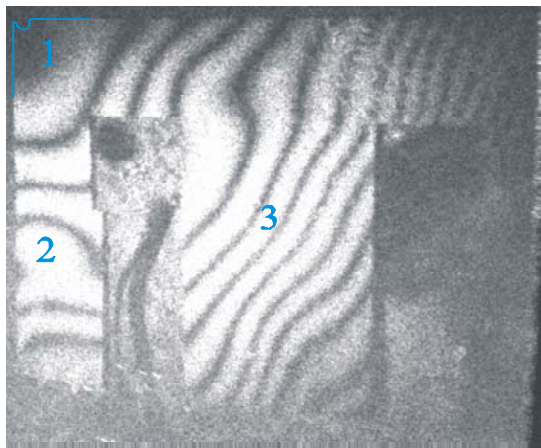


Figura 12. Muestra 2-B Δt de 2 ° C

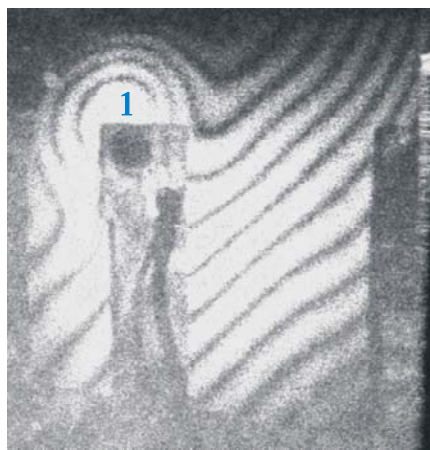


Figura 13. Muestra 3-B Δt de 2 ° C

Nuevamente observamos que existe similitud en la rama central con una pieza cortada por prensa, esto es la muestra 1 en la figura 5.

En el análisis de la muestra catalogada como 3 – B, manteniendo un intervalo de temperatura de 2 ° C. Al ser observada la figura 13, la cual fue obtenida con un ángulo de observación de 35 °, podemos ver claramente que la rama central del núcleo presenta una deformación uniforme pero se puede apreciar una zona de deformación alineal y localizada en el ángulo interior izquierdo, tal como fuera observado en la muestra 2 figura 10.

2.2.4 Análisis de partes E cortadas con láser de forma modificada

Las presentaciones sucesivas muestran piezas analizadas correspondientes a muestras modificadas morfológicamente, según el esquema de corte mostrado en la figura 14. En éstas se eliminaron los puntos angulares externos y se introdujeron curvas en lugar de ángulos en los cortes interiores. Las condiciones de obtención de los hologramas son

similares a las aplicada anteriormente, con intervalos de temperatura de 2°C en todos los casos.

Para la muestra catalogada como 6-C, figura 15. Las franjas se presentan en una distribución poco homogénea repitiéndose los patrones observados en casos anteriores en la zona 2. La zona 3 aparece como una zona de deformación localizada de tipo perpendicular. Entre la zona 1 y la 2 se nota una ausencia casi total de franjas, es de destacar que en la zona 1 desaparece todo indicio de deformación localizada.

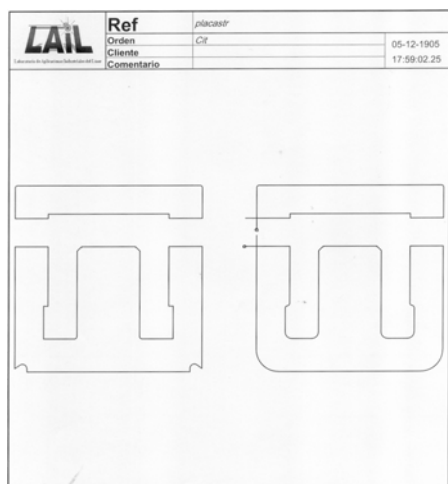


Fig. 14. Diseño de piezas introducidas en el CNC, del láser.

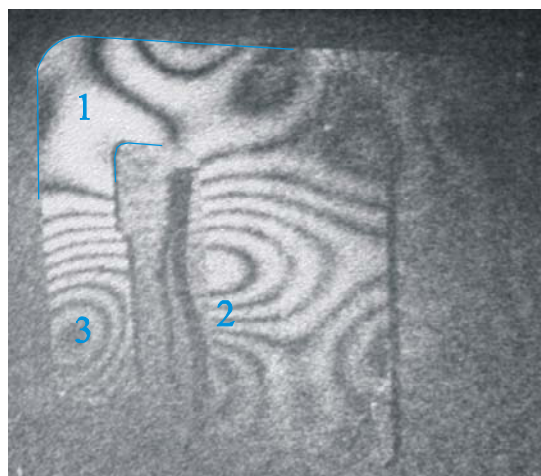


Figura 15. Muestra 6-C, Δt de 2°C .

Par a la muestra catalogada como 7-C se repiten las condiciones de obtención del holograma y con ángulos de observación similares, 35° respecto de la normal, es posible obtener la fotografía mostrada en la figura 16. En ésta nos encontramos con una zona 1 prácticamente desprovistas de franjas al igual que en la muestra 6-C. Por otra parte se repiten los resultados en la zona 2 ya observados en otros hologramas.

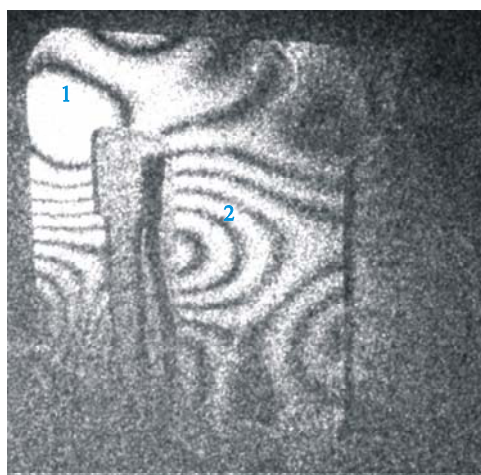


Fig. 16. Muestra 7-C, Δt de 2°C .

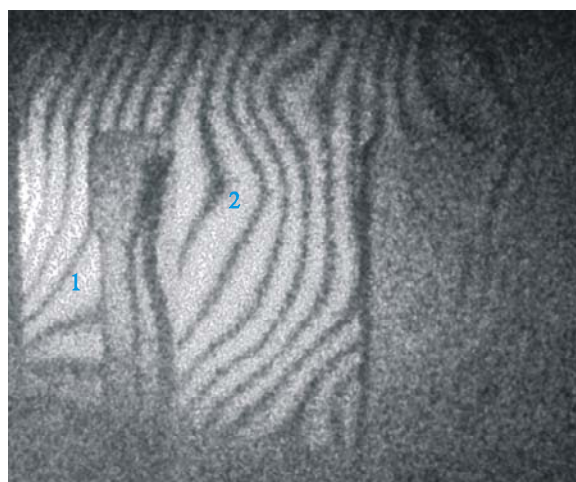


Fig 17. Muestra 8-C, Δt de 3°C .

En la muestra catalogada como 8-C, analizada bajo igual ángulo de observación e intervalo de temperatura de 3°C , se puede observar una uniformidad en la distribución de franjas tanto en las zona 2 de la figura 17, como en la zona 1. Nuevamente en las muestras

cortadas con láser y morfológicamente modificadas desaparecen ordenamientos de franjas localizadas y alinéales en las zonas de corte interiores.

3 Conclusiones particulares

Hasta ahora hemos realizado una descripción de los procesos de corte y de los resultados derivados de la aplicación de estos procesos. Por otra parte se describió el resultado del análisis realizado por medio de interferometría holográfica a cada conjunto de muestras. Toda esta información presentada en una descripción sucinta en este texto, pero relevante desde el punto de vista científico, aporta información detallada de los procesos y operatorias implementadas, **sin embargo no es información que resulte de utilidad al fabricante.**

Para la toma de dediciones en el ámbito industrial, la información científica, rigurosamente elaborada, suele generar confusión. El industrial o los ingenieros de producción requieren de **información simple** que les permita en forma **segura** la toma de decisiones.

En este caso la pregunta a responder puede ser transcripta en pocas palabras;

¿Cuál de los dos procesos es mejor?

Si bien la pregunta es simple la respuesta no es trivial y cuando desde el sector industrial se realiza esta, la respuesta debe abarcar un espectro bastante amplio.

3.1 Primera respuesta

Para analizar el comportamiento dinámico de las piezas la holografía resulta ser la herramienta correcta. El análisis comparativo de los resultados muestra que existen tensiones residuales asociadas al proceso de laminación, al tipo de corte y que la forma de la pieza libera de determinadas tensiones a la E final.

En función de esto si el principal problema que debe ser resuelto es la calidad final del producto, con una disminución importante en los niveles de vibración y de emisión sonora del balasto así como una mejora en el factor de apilado, debe ser implementada la tecnología de corte por láser.

3.2 Segunda respuesta

Si el problema a resolver es la posibilidad de mejorar los tiempos de producción mediante la implementación del corte por láser, la respuesta al industrial es simple. Los cortes con láser no pueden superar en tiempo a la prensa de corte rápido por lo cual es tecnología que debe ser rechazada en la fabricación de pequeños núcleos.

La respuesta es diferente si en lugar de encontrarnos ante la propuesta de fabricación solicitada pro Italavia – ELT nos situamos respecto de la propuesta de fabricación de Tadeo Czeweny. En el caso de los transformadores de alta potencia las pérdidas de potencia asociadas al corte con prensa implica una sobredimensión de los núcleos y por lo tanto un aumento en el coste. Por otra parte el tiempo de producción en este caso asociado a los tiempos del láser tornan competitiva la aplicación del CO₂.

3.3 Tercera respuesta

El láser resulta ser una herramienta de fundamental importancia en la construcción de prototipos evitando la costosa fabricación de matrices. Si lo que se desea es una herramienta de desarrollo se sugiere la compra de un láser de baja potencia y coste medio que permita variar rápidamente la morfología final del balasto en desarrollo.

4. Conclusión

Como hemos querido demostrar en este trabajo, la información generada en el laboratorio no siempre es transferible en forma directa a la fábrica, sin embargo son los actores involucrados en el estudio científico los que deben generar la información útil, entendible y segura para que el sector industrial sea capaz de comprender y decidir en base a lo transferido el camino que desea seguir en el desarrollo de la empresa.

En este caso, el trabajo realizado con la Empresa Italavia – ELT, buscaba ver la posibilidad de implementar la tecnología del láser como herramienta de producción para lo cual con la información obtenida de los laboratorios y de la obtenida de la línea de producción se pudo definir claramente la inviabilidad de la misma con la tecnología láser disponible actualmente. Sin embargo esto no constituye un fracaso en la transferencia dado que la información suministrada, generada científicamente, sirvió objetivamente al directorio de la empresa para tomar la decisión de mantenerse en el actual esquema de producción, No sin antes haber mediado una transformación del laboratorio a la fábrica.

6. Referencias y bibliografía consultada.

Liu and Kurtz, Handbok of Optical Holography, Academic Press, Chapter 8, First Edition 1977.

P. Hariharan, Optical holography Principles, Techniques, and Applications. Second Edition 1996. Cambridge University Press.

G Brandt . Handbok of Optical Holography, Academic Press, Chapter 8, First Edition 1977.

Shoko Takaoa, Satoru Yoneyamab, Masahisa Takashi, Minute displacement and strain analysis using lensless Fourier transformed holographic interferometry, Optics And Laser In Engineering, Vol 38 pag. 233–244, November 2001.

William T Silfvast. Laser Fundamentals – Cambridge University Press – Primera edición 1995.

Bachs – Cuesta – Carles. Aplicaciones Industriales del Láser. Marcombo editores – 1988.

M. Boutinguizaa, J. Poua, F. Lusquinosa, F. Quinteroa, R. Sotoa, M. Plerez-Amora, K. Watkinsb, W.M. Steenb. CO2 laser cutting of slate - Optics and Lasers in Engineering 37 (2002) 15–25.



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A152

Determinación de las deformaciones inducidas por ondas sonoras en materiales elásticos por interferometría holográfica y su contraste por el método de elementos finitos

Fabio Vincitorio ^(a)
Arturo Cassano ^(a)
Hernán Barrera ^(a)
Diego Siboldi ^(a)

(a)Facultad Regional Parana, Universidad Tecnológica Nacional. Almafuerde 1033, Paraná, Argentina.
E-mail: cyt@frp.utn.edu.ar

ABSTRACT

The holographic interferometry is a high precision of measurement method which have a possibility to obtain quantitative and qualitative information about the change suffer by the object under study when this is affected by a induced excitation. Normally, is used a thermal excitation because this methods is simpler and inexpensive, but in may cases is impossible apply it without affect a composition of the material. An option is use a sound wave excitation of the object, in this method a buzzer of fix or variable frequencies is used to change the dimension of it.

The particular case of study of the art work conservation, the sound excitation is under study and is used to generate a resonance of the object. The final vibration pattern is registered in the hologram by double way double exposure holographic technique and it is analyzed to locate defects.

On the other hand the finite method elements is used to obtain the theoretical behavior of a vibrant membrane by numerical simulation in it natural modes when the excitation frequency is changed.

A comparison of theoretical result and the result obtained by holographic interferometry is applied on a membrane system specially construct to study a membrane resonance. The information obtained by this study it be will applied of the art work conservation by sound wave excitation.

RESUMEN

La interferometría holográfica como herramienta de medición presenta un alto grado de precisión conjugando la posibilidad de obtener información tanto cualitativa como cuantitativa del comportamiento del objeto bajo estudio. Para poder obtener esta información es necesario inducir mediante algún método una deformación mecánica del cuerpo. Habitualmente, por su sencillez de implementación, es usada la deformación inducida por dilatación térmica de la pieza, pero esto no en todos los casos es posible sin afectar las características del material.

Una opción al calentamiento es la excitación por ondas de sonido, técnica actualmente en fase de desarrollo para el caso particular del estudio del estado de conservación de obras de arte.

Experimentalmente un buzzer de frecuencia fija e intensidad variable puede ser usado como mecanismo excitación generando una zona de deformación acotada, que con la técnica de interferometría holográfica de doble exposición puede ser analizada.

La utilización del método de elementos finitos permite obtener mediante simulación numérica el comportamiento teórico de una membrana vibrando en sus frecuencias y modos naturales o inducidas por alguna fuente externa. La correlación de los resultados teóricos con la respuesta de la membrana real puede, incluso, ser extendida a modelos con fallas locales provocadas para simular el deterioro de las obras de arte.

1 Introducción

La holografía inventada conceptualmente por el ingeniero húngaro Denis Gabor tuvo se apogeo como método de diagnóstico no destructivo en la década del 70. Básicamente la técnica aplicada en aquellos años consistía en la implementación de la técnica denominada interferometría holográfica, la cual permitía obtener información tanto cualitativa como cuantitativa de las deformaciones volumétricas inducidas en un objeto. Sin embargo resultaba sumamente difícil el análisis cuantitativo debido a las dificultades que se observaban para relevar el holograma.

Actualmente la interferometría holográfica ha encontrado nuevos campos de aplicación en los cuales resulta ser una herramienta indispensable por el nivel de precisión que puede ser obtenido en las mediciones con el auxilio de sistemas informáticos y cámaras de CCD, así como también por la información cualitativa que resulta ser de fundamental importancia en campos de aplicación tales como el diagnóstico del estado de conservación del patrimonio histórico y cultural.

Para la implementación de ensayos no destructivos por interferometría holográfica existen diferentes técnicas tales como la de doble exposición o de tiempo real, si bien el principio físico que las rige es el mismo. En todos los casos al objeto bajo estudio es necesario inducirle una deformación volumétrica, generalmente por su simplicidad es usada dilatación térmica. Esta forma de introducir un cambio en las dimensiones de la pieza no puede ser siempre aplicada por lo que se ha recurrido a métodos alternativos tales como la excitación acústica. Las ondas de sonido son una excelente forma de generar variaciones en las dimensiones de los cuerpos a partir del acoplamiento por resonancia de los objetos. En el caso particular de superficies planas los ensayos se limitan a la obtención de deformaciones por vibración inducidas por las ondas de sonido, con respuestas similares a las esperadas por membranas vibrantes, caso de particular interés para el diagnóstico del estado de conservación de obras de arte.

El método de los elementos finitos (MEF) se remonta a la década del cincuenta, cuando el recién nacido ordenador digital hacia por fin posible el cálculo automático de estructuras de barras sin recurrir a tediosos procedimientos de relajación. Se concibió entonces una nueva técnica de cálculo, inabordable sin la ayuda del ordenador, que fue bautizada con el nombre de "cálculo matricial de estructuras", en reconocimiento del papel que desempeña el álgebra matricial en su formalismo matemático.

Recordemos que el cálculo matricial de estructuras se basa en la idea de dividir la estructura en barras, dentro de las cuales se conoce la solución exacta en función de ciertos coeficientes que se hacen coincidir con los movimientos de los nodos extremos. Dichos coeficientes se obtienen planteando el equilibrio de todos los nodos de la estructura y resolviendo el sistema de ecuaciones que resulta. De esta manera, conocidos los coeficientes o movimientos nodales, se desciende de nuevo al nivel local de cada barra y se obtiene la solución de esfuerzos y movimientos en el conjunto de la estructura por agregación de soluciones locales.

El MEF nació como una generalización de esta idea básica del cálculo matricial. Alguien que trabajaba con sistemas estructurales complejos, que no se idealizaban bien

mediante entramados de barras, pensó que podía dividir su estructura en “elementos” más complejos que una simple barra. Estos elementos estarían conectados entre si también en nodos pero, a diferencia con el calculo matricial, dentro de ellos solo conocía la solución de manera aproximada en función de los movimientos nodales. Al igual que en el calculo matricial, a partir de las soluciones locales se podía plantear el equilibrio de los nodos y obtener los movimientos nodales resolviendo un sistema de ecuaciones. Estos movimientos nodales definían la solución dentro de cada uno de los “elementos” en que se había dividido la estructura y, por agregación, la solución en toda ella. Lo que ocurría es que, ahora, esta solución no era la exacta, sino una aproximación.

Así pues, el MEF nació en el ámbito del cálculo de estructuras y esto ha impregnado toda la terminología asociada al mismo. La idea básica seguía siendo la misma: la división del dominio de cálculo en pequeños subdominios y la aproximación en ellos de la variable de campo en función de su valor en puntos privilegiados llamados nodos.

En los últimos años y a partir del desarrollo y expansión de los computadores personales, se ha convertido en la herramienta por excelencia a la hora de generar modelos que nos permitan conocer la respuesta de sistemas a diferentes tipos de excitaciones. Es así que pueden ser evaluados desde respuestas a calentamientos localizados generados por láser de alta potencia hasta el estudio del comportamiento de una membrana vibrante.

El estudio comparativo de los resultados obtenidos por interferometría holográfica y el método de los elementos finitos, sobre sistemas sencillos tales como membranas circulares elásticas o rígidas sometidas a excitación acústica constituye el paso previo fundamental para la aplicación a problemas concretos. La información así obtenida es la que aporta la base de calibración de los métodos, como resultado de la comparación de las respuestas de sistemas ideales obtenidos mediante las simulaciones por elementos finitos con las respuestas de sistemas reales obtenidos por medio de la holografía.

2.1 Principios generales de la holografía.

Básicamente los hologramas pueden ser construidos mediante dos técnicas generales, los hologramas de transmisión y los hologramas de reflexión (su calificación depende de cómo es la observación y no su construcción). El primero de los casos es el caso particular de interés ya que es el que permite obtener hologramas interferométricos usados habitualmente en los NDT.

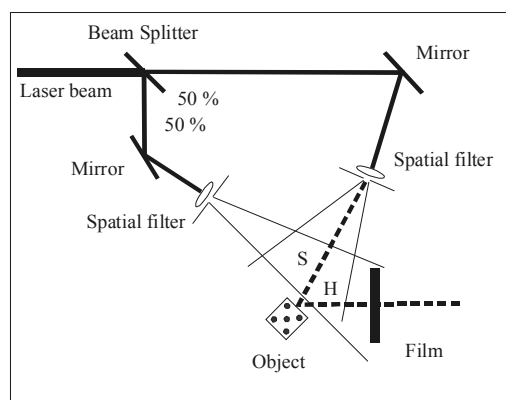


Figura 1. Esquema general para la obtención de hologramas de transmisión para ensayos no destructivos.

Un esquema general de implementación puede verse en la figura 1, en el cual la luz proveniente del láser es dividida mediante un divisor de haz en dos caminos ópticos, que en la

práctica no deberán diferenciarse en más de una distancia equivalente a la longitud del tubo de láser usado, esto para evitar pérdidas de coherencia.

Cada haz es direccionado mediante espejos hacia sendos filtros espaciales los cuales expandirán los respectivos haces que posteriormente incidirán sobre el objeto y la película respectivamente. Aquí debemos recordar que el haz de referencia deberá ser de mayor intensidad que el haz reflejado por el objeto por lo cual dos opciones son posibles, usar un divisor de haz no simétrico o usar filtros espaciales con diferentes pin-holes. De esta manera se debe buscar las relaciones de intensidad necesarias para lograr la imagen holográfica. Es normal considerar que el haz de referencia deberá ser unas diez veces mayor al proveniente del objeto.

$$I_R \cong 10 \cdot I_O \quad (1)$$

A partir de esto es posible lograr imágenes de objetos particulares pero que no aporta más información que la relacionada a sus dimensiones. Si quisiéramos analizar el comportamiento dinámico del objeto, cuando este es sujeto de excitaciones inducidas, deberemos hacerlo mediante la técnica de doble exposición. Básicamente esta consiste en superponer dos hologramas del mismo cuerpo pero en dos condiciones diferentes, induciendo en una de ellas una deformación que deberá ser en todos los casos del orden de unas cuantas longitudes de onda. Por el contrario si las deformaciones fueran de magnitudes mucho mayores a la longitud de onda y hasta macroscópicas, estas pueden ser registradas mediante la misma técnica pero la información aportada será diferente. En el primer caso sobre la imagen resultante observaremos la superposición de franjas oscuras y claras las cuales nos indican la magnitud y la forma de la deformación sobre el objeto (Figura 2). En el segundo caso observaremos dos imágenes diferentes del mismo cuerpo, se podría decir que vemos como una sobra, la cual no es mas que la imagen del objeto con mayores o menores dimensiones dependiendo del caso.

Matemáticamente si queremos definir la formación de la imagen de un holograma de doble exposición con variación de las dimensiones del cuerpo corresponde el siguiente planteo. Cuando el cuerpo O es iluminado por una fuente de luz coherente un punto particular P sobre la superficie de este dispersa luz en todas direcciones, interesándonos una dirección particular que se dirige hacia el medio de registro. La luz dispersada llega al film F a través del camino óptico H. El haz de referencia $U_r(x,y)$ llega al film mediante el camino óptico de referencia. Si el camino seguido por la luz proveniente del objeto cambia levemente su camino óptico de tal manera que la diferencia sea pequeña entre la primera y la segunda exposición, podemos definir un nuevo frente de onda correspondiente a una nueva condición. Es así que si $O_1(x,y)$ se convierte en $O_2(x,y)$ la imagen final registrada sobre el holograma será una combinación de $U_r(x,y)$, $U_1(x,y)$ y $U_2(x,y)$. Cuando el holograma final es reconstruido, este estará compuesto por la combinación de dos semi – hologramas sobre los cuales aparecerá un patrón de interferencia.

$$O_1(x, y) = a(x, y) \cdot e^{[-j\phi(x,y)]} \quad (2)$$

La ecuación 2 representa la luz proveniente del punto P del objeto antes de introducir un cambio en el volumen del mismo mediante la perturbación. El ángulo $\phi(x,y)$ representa la información asociada a la fase de la onda dependiente de las características del objeto en el punto P.

$$O_2(x, y) = a(x, y) \cdot e^{[-j\{\phi(x,y)+\Delta\phi(x,y)\}]} \quad (3)$$

La Ecuación 3 representa el frente de onda proveniente del punto P luego de haberse producido la deformación del cuerpo, donde $\Delta\phi(x,y)$ representa el cambio en la fase producido por el cambio en el camino óptico debido al cambio en el volumen del objeto.

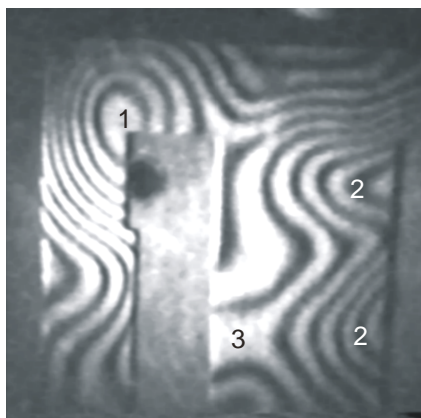


Figura 2. Imagen resultante de un holograma interferométrico de la parte E de un núcleo de transformador excitado térmicamente, los patrones de franjas claras y oscuras sobrepuestos a la imagen final representan la deformación sufrida. La zona indicada como 1 representa deformación perpendicular al plano de la pieza.

La formación final de la imagen dependerá de la combinación de los tres frentes de onda sobre la película, expresado por.

$$I(x, y) = |U_1(x, y) + U_2(x, y)|^2 = |2 \cdot \alpha(x, y)|^2 \{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\} \quad (4)$$

donde $2\alpha^2(x,y)$ es la amplitud del frente de onda asociado a la imagen del objeto y $\Delta\phi(x,y)$ es la diferencia de fase debida al cambio de camino óptico entre ambas exposiciones. Puede observarse que la imagen final queda modulada por el coseno del cambio total de fase lo que originará existan zonas de franjas oscuras y zonas claras sobre la imagen final del objeto. Así cada una de estas franjas está representando un cambio de fase 180° en el camino óptico total.

2.2 Principios generales del método de elementos finitos.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema algebraico con un número de grados de libertad finito. En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio: espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, etc.
- Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas.

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. Para el caso en estudio se optó por la formulación isoparamétrica, que permite generar elementos de formas no estructuradas, lo que tiene obvias ventajas para el modelado de geometrías de formas arbitrarias y bordes curvos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, los nodos, que conectan a los mismos elementos entre sí. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos es posible obtener deformaciones específicas, tensiones, giros, etc.

3. Procedimientos

3.1 Ensayo por interferometría holográfica de una membrana elástica vibrante

Para el estudio de una membrana elástica vibrante se utilizó el esquema indicado en la figura 1, utilizándose un láser de Helio – Neón de 10 mW, un filtro espacial para el haz de referencia de 5 μm , un filtro espacial para el haz del objeto de 15 μm , espejos de primera superficie y un divisor de haz 50/50. Como medio de registro fue usada película holográfica Slavich PG-3 con una definición mínima de 3000 líneas/mm. El proceso de revelado usado es el JD-2 de Photrgraphyc Formulary®. Como sistema de referencia se construyó un dispositivo capaz de alojar una membrana, la cual se convirtió en el objeto bajo estudio, constituida por una membrana de goma la cual fue ubicada de acuerdo al esquema de la figura 3. Como mecanismo de excitación se utilizó un buzzer PK12-40PA de la firma Hitpoint Inc, el cual presenta una frecuencia de emisión de 4,1 KHz, 80 dB 5 mA y 86 dB a 9mA. Para la realización de los ensayos se utilizó la técnica de doble exposición con semiperíodos de 4 s y 5 s, para la exposición de la película a la membrana en reposo y a la membrana excitada respectivamente.

Se realizaron un total de 8 hologramas, uno de calibración de los parámetros de operativos y 7 de tipo interferométrico, 5 separados en intervalos de corriente de 1 mA dentro de la zona de respuesta lineal y dos en los extremos de la curva indicada por el fabricante del mecanismo de excitación.

3.2 Simulación por elementos finitos de una membrana elástica vibrante

Para validar lo obtenido mediante interferometría holográfica, se realizó un análisis mediante elementos finitos. El análisis realizado fue una determinación de modos y frecuencias propias de la membrana de goma utilizada en el ensayo. El modelo fue realizado utilizando el software ALGOR® disponible en la facultad regional Paraná, con elementos tipo placa de corte reducido con formulación isoparamétrica de cuatro nodos. Se utilizó una malla no estructurada (Figura 4) con el objeto de no influenciar en la solución de desplazamientos con una posición simétrica de los nodos.

Para desarrollar el análisis fue necesario realizar una medición de los parámetros que deben ser considerados para la obtención del modelo. Para esto se procedió con la medición de los mismos cuyos valores se encuentran documentados en la tabla 1.

Las condiciones de borde simulan el empotramiento real del dispositivo de sujeción el cual puede ser visto en la figura 4. En este la membrana fue sujeta mediante dos aros paralelos los cuales se los une entre si mediante tornillos.

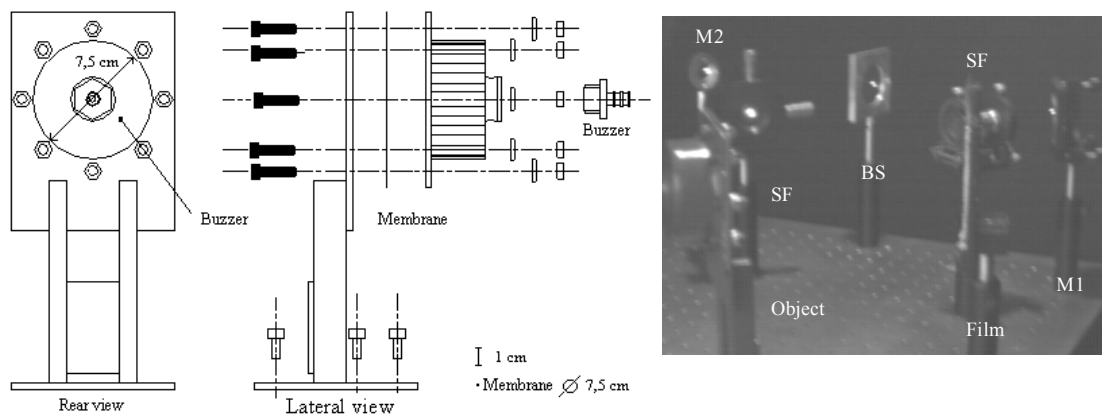


Figura 3. (a) Despiece del sistema utilizado como objeto de referencia para el estudio del comportamiento de la membrana elástica vibrante. (b) Esquema utilizado para la obtención de los hologramas; SF Filtro espacial, BS divisor de haz, M1,2 espejos.

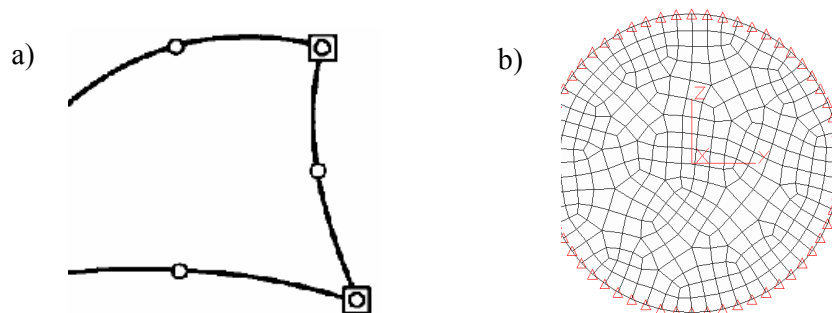
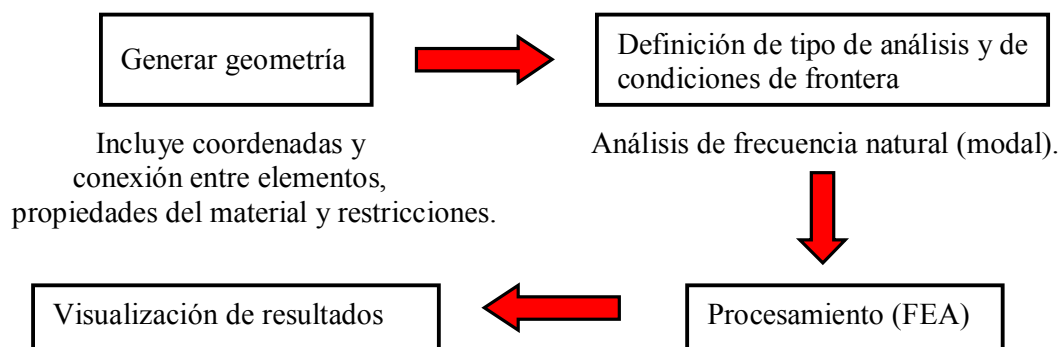


Figura 4. a) Elemento Isoparamétrico, \square p el que se especifica gdl (nodos), \bigcirc punto en el que el software interpola. b) Malla (división del dominio) de estudio.

El procedimiento de simulación puede resumirse esquemáticamente en el siguiente modelo;



4 Resultados

4.1 Método de análisis holográfico

El primero de los hologramas obtenidos fue realizado con una corriente de excitación de 3 mA en el límite de la zona de respuesta lineal del buzzer, en este caso puede observarse en la figura 5 la formación de 3 zonas antinodales bien definidas con una excursión perpendicular al plano de la membrana de magnitud similar en dos de ellas y un poco menor en la zona ubicada arriba a la izquierda. La magnitud de la deformación sufrida durante la oscilación es de $0.730\ \mu\text{m}$ respecto de la posición de equilibrio.

El segundo de los hologramas aquí documentados corresponde a una corriente por el buzzer de 5 mA, esto es en el centro de la zona lineal de funcionamiento de este. El holograma, que en este caso es observado desde un ángulo levemente inferior al de observación de las deformaciones puras en z (ángulo por el cual solo son visibles las deformaciones en sentido perpendicular al plano del objeto), muestra la existencia de zonas antinodales ubicadas en la parte superior e inferior izquierdas de una amplia excursión y que dada la falta de claridad de la imagen no es posible cuantificar.

En la zona central de la membrana es posible definir claramente la existencia de dos zonas nodales ubicadas en una simetría opuesta respecto del centro de la membrana, al igual que en el caso anterior con magnitudes diferentes de deformación.

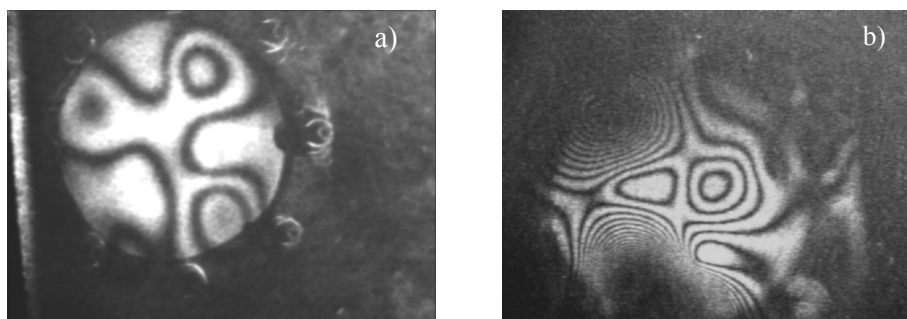


Figura 5. a) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 3 mA. b) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 5 mA.

Al elevar la corriente de excitación del buzzer a 8 mA, nos encontramos con un patrón de franjas que representa modos de oscilación totalmente diferente en cuanto a su distribución. En la figura 6 vemos representada la imagen resultante para este último valor de corriente. Claramente podemos observar dos zonas antinodales de magnitudes bien definidas encontrándonos con la particularidad de la existencia de una amplia zona nodal en el centro inferior derecho. La izquierda de la imagen representa una zona de una excursión apenas superior a una longitud de onda claramente definida por la línea de división que representa la primera franja a la izquierda de la zona nodal. Existe además un punto oscuro situado entre los dos antinodos, este representa una zona de vibración cuya excursión máxima (inferior – superior) de apenas 1,5 longitudes de onda. Respecto de las magnitudes de deformación registradas nos encontramos con una excursión máxima simétrica de $0,841\ \mu\text{m}$ en la zona antinodal ubicada en la parte superior de la imagen.

Finalmente la imagen del holograma correspondiente a una corriente de excitación del buzzer de 15 mA presenta una patrón de franjas de interferencia que claramente demuestra un modo de oscilación cercano a lo que podría definirse como modos de oscilación simétrico. La distribución de franjas es de tipo concéntrica teniendo el punto de mayor excursión de la

membrana en el centro de la misma, ubicándose la zona nodal en el borde de esta. La segunda franja no resulta perfectamente circular lo que nos indica que o bien el coeficiente de elasticidad no es homogéneo o existen diferencias de tensión producidas durante la fijación de la membrana al soporte.

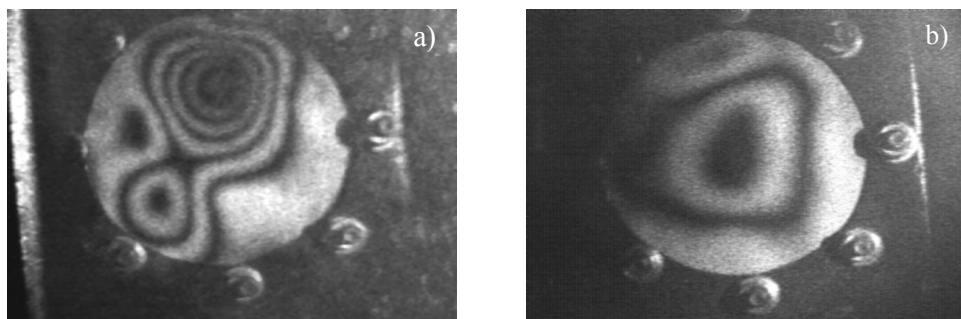


Figura 6. a) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 8 mA. b) Imagen resultante del holograma de la membrana elástica para una excitación del buzzer de 15 mA.

4.2 Simulación por el método de los elementos finitos

Se obtuvieron 15 modos naturales de vibración, obtenidos por simulación basada en las mediciones de los parámetros antes mencionados, a sus correspondientes frecuencias. Esto es en el rango que va desde los 700 Hz hasta los 6398 Hz. De estos 15 modos podemos observar en la figura 7 los modos de vibración para las frecuencias de 3690 Hz y 3707 Hz las cuales son muy cercanas entre si. Comparativamente con los resultados obtenidos por holografía nos encontramos que ambas son similares en la distribución de los antinodos a los resultados obtenidos en el holograma de 3 mA mostrado en la figura 5.

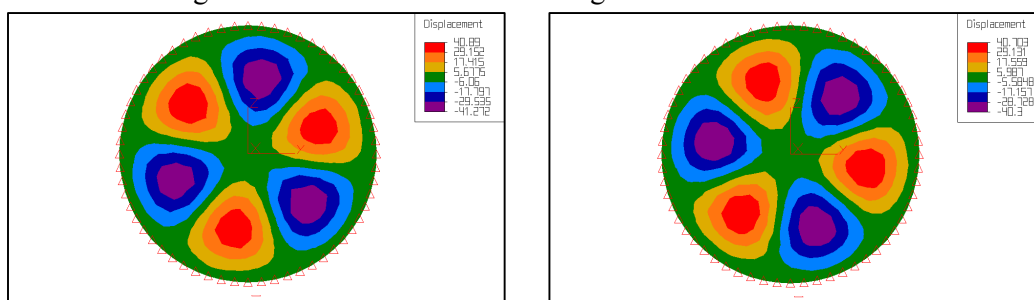


Figura 7. Simulaciones resultantes de los modos naturales de vibración de la membrana elástica para frecuencias de 3690 Hz y 3707 Hz..

En la simulación de oscilación mediante MEF dentro del rango de frecuencia definido por el fabricante del buzzer, 4100 Hz nos encontramos que la membrana presenta un modo propio a 4344 Hz, levemente superior a la frecuencia de excitación. La respuesta a la frecuencia del buzzer es vista en el holograma de la figura 5 (b) mientras que la simulación en su modo natural es mostrado en la figura 8 (a). Vemos que en el análisis comparativo de ambas figuras existen coincidencias en la parte central de la membrana, no así en los laterales, donde el holograma muestra un patrón sumamente más complejo.

Finalmente en la simulación de 6398 Hz, figura 8 (b) vemos que la simulación resultante es coincidente con la distribución de franjas mostrada en la figura 6 (b).

En el análisis comparativo queda sin contraparte la figura 6 (a) en la cual el holograma presenta dos antinodos. Sin embargo dado que los modos de vibración naturales, obtenidos

por simulación, se presentan a valores discretos de frecuencias, podría pensarse que el holograma obtenido para 8 mA es una condición intermedia de frecuencia entre dos modos naturales de oscilación inducida por el buzzer.

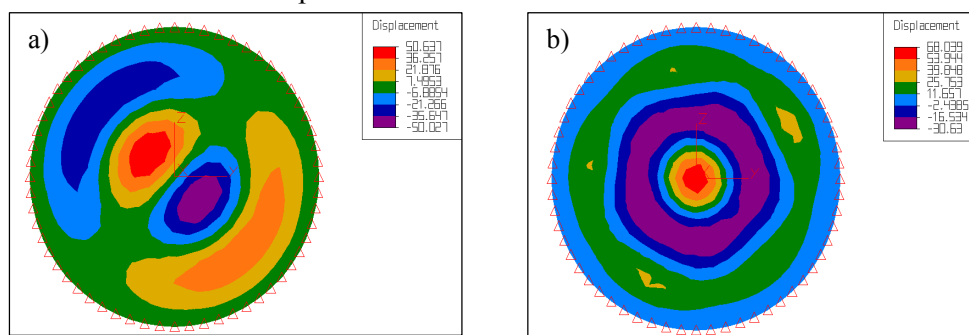


Figura 8. a) Simulación resultantes de los modos naturales de vibración de la membrana elástica para frecuencia de 4344 Hz, b) frecuencia natural de resonancia a 6389 Hz..

Sin embargo esta explicación debe sustentarse en una variación de frecuencia en este. Realizada la medición de este parámetro en función de la variación de corriente de excitación, utilizando como instrumento de medición un osciloscopio digital Tektronix TDS 210®, se ha encontrado que la mínima frecuencia obtenida es de 4089 Hz a 3 mA y de 4180 Hz 15 mA lo que muestra un alto grado de estabilidad para este dispositivo.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos hemos comprobado que es posible determinar los modos de vibración de una membrana expuesta a una excitación externa por ondas de sonido.

Es posible definir por métodos holográficos la existencia de pequeñas variaciones en la frecuencia al ser contrastado con el método de elementos finitos. Sin embargo no hemos podido explicar la existencia de coincidencias en los modos de vibración de la membrana obtenidos por holografía con los modos naturales de oscilación a una frecuencia mucho mayor a la medida en el funcionamiento del buzzer.

Análisis posteriores deberán ser realizados para dar explicación a esta última condición.

6. Agradecimientos

A los coautores de este trabajo, Dr. Alberto Ramil, Dra. Ana Jesús López, Dr. Armado Yáñez de la Universidad de la Coruña, a Emmanuel Boaglio y Lisandro Figueroa integrantes del laboratorio de holografía de la Regional Paraná de la UTN.

7. Referencias

- Caufield H.J. 1979 "Handbok of optical Holography". Academic Press, San Diego California EEUU.
- Hariharan P. 1996 "Optical Holography Principles, techniques and applications" Candbridge Ubiversity Press, EEUU.
- Asmus, J. F., "Non-divestment laser applications in art conservation", J. Cult. Heritage, 4, 289s–293s, (2003).
- Tornari, V. "Laser interference–based techniques and applications in structural inspection of works of art", Anal. Bioanal. Chem, 387, 761–780, (2007).
- http://www.hitpoint.tw/electronic/en/product/pk_pf_pl-series/pk-12n40pa.htm

LUZ Y HOLOGRAFÍA ARTE Y PRESERVACIÓN

Fabio Vincitorio, Alberto Ramil, Ana J. López

Resumen -- La utilización de la luz como herramienta de valorización de cualquier expresión artística es un hecho bien conocido y aplicado por los artistas plásticos. Sin embargo si la luz no es utilizada adecuadamente podrá llegar a generar un efecto adverso sobre aquello que quiere destacar.

En la pintura la utilización de la iluminación debe guardar particulares condiciones para no convertirse en herramienta de destrucción al tiempo que la misma luz puede ser usada como herramienta de restauración.

En los últimos años la utilización de la luz láser se está imponiendo en el campo de la conservación de obras de arte tanto en su análisis, limpieza o documentación. En este contexto las técnicas de evaluación no destructiva basadas en la interferometría holográfica han encontrado un importante nicho para la determinación no destructiva de defectos estructurales (grietas, desprendimientos, etc).

En la interferometría holográfica se suele utilizar una fuente luminosa de alta potencia para producir variaciones de temperatura en el objeto que den lugar a los procesos de interferencia de la luz láser en los que se basa la técnica. En ciertos materiales sensibles, estas variaciones de temperatura pueden poner en riesgo la integridad física de la obra en restauración.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer las ventajas que implica la utilización de la luz como herramienta de preservación a través de las técnicas interferometría holográfica a la vez que presentar alternativas a la utilización de fuentes de luz para producir el interferograma holográfico cuando esta pueda resultar de riesgo para el objeto a preservar.

Palabras claves – Ensayos no destructivos, holografía, interferometría, luz, láser, restauración, patrimonio, preservación, procesos.

Nomenclatura

Holograma: se denomina holograma a las imágenes tridimensionales generadas a partir de la utilización de una fuente de luz coherente.

LIBS (Laser induced plasma spectroscopy): técnica espectroscópica que permite conocer la composición de materiales ablacionados con un láser de potencia

I. INTRODUCCIÓN

LA holografía es una técnica de registro de imágenes inventada conceptualmente por el Ing. Húngaro Denis Gabor en el año 1947 que le permitió obtener el premio Nóbel de Física en el año 1971. La invención del láser dio lugar a que los conceptos desarrollados por Gabor tomaran rápidamente forma al contar con una fuente de luz de muy alta coherencia, elemento inexistente en los años 40. Así gran cantidad de aplicaciones fueron surgiendo en aquellos años, sin embargo se estima que el primer contacto entre la preservación del patrimonio histórico y artístico se produjo en los años 70 en Venecia. Ante la presunción de una inundación catastrófica de la ciudad, un láser de rubí fue montado para obtener 50 hologramas de tamaño real de las principales estatuas que se encontraban diseminadas en la ciudad, con el fin de generar un archivo de referencia ante su eventual pérdida [1].

Por otra parte artistas de la talla de Salvador Dalí reconocieron enseguida en la holografía una expresión artística en si misma. Hoy existen museos holográficos en las principales capitales.

Mucho menos conocidas son las posibilidades que brinda la holografía como herramienta de diagnóstico del estado de preservación de las obras de arte. El conocer el estado estructural en el que se encuentran ha sido para los restauradores el problema de base antes de realizar cualquier intervención. La holografía combinada con técnicas interferométricas permite, con una precisión del orden de los nanómetros, conocer el estado de integridad estructural en el que se encuentra un objeto, aportando tanto información cualitativa como cuantitativa.

F.M. Vincitorio Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Paraná, Almafuerde 1033 Paraná Entre Ríos Argentina (fiscaelectronica@frp.utn.edu.ar).

Alberto Ramil Rego Universidade Da Coruña – Escuela Politécnica Superior. 15403 Ferrol, España.

Ana Jesús López Díaz Universidade Da Coruña – Escuela Politécnica Superior. 15403 Ferrol, España.

II. LA LUZ Y LA INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA COMO TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO Y HERRAMIENTA DE PRESERVACIÓN

A. Conceptos básicos.

Los hologramas pueden ser construidos mediante dos técnicas generales, la de transmisión y la de reflexión, sin embargo su calificación depende de cómo es la observación y no su construcción. El primero de los casos es el caso particular de interés ya que es el que permite obtener hologramas interferométricos usados habitualmente en los Ensayos No Destructivos (Non Destructive Test).

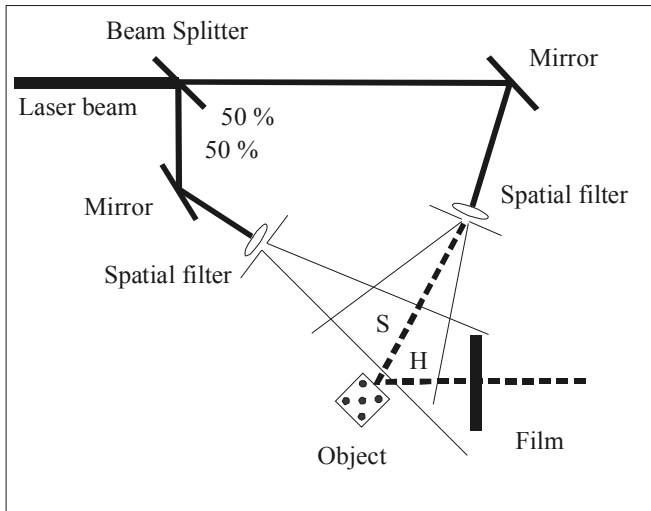


Figura - 1. Esquema general para la obtención de hologramas de transmisión para ensayos no destructivos

Un esquema general de implementación puede verse en la figura 1, en el cual la luz proveniente del láser es dividida mediante un divisor de haz en dos caminos ópticos, que en la práctica no deberán diferenciarse en más de una distancia equivalente a la longitud del tubo de láser usado, esto para evitar pérdidas de coherencia.

Cada haz es direccionado mediante espejos hacia sendos filtros espaciales los cuales expandirán los respectivos haces que posteriormente incidirán sobre el objeto y la película respectivamente. Aquí debemos recordar que el haz de referencia deberá ser de mayor intensidad que el haz reflejado por el objeto por lo cual dos opciones son posibles, usar un divisor de haz no simétrico o usar filtros espaciales con diferentes pin-holes. De esta manera se debe buscar las relaciones de intensidad necesarias para lograr la imagen holográfica. Es normal considerar que el haz de referencia deberá ser unas diez veces mayor al proveniente del objeto.

$$I_R \cong 10 \cdot I_O \quad (1)$$

A partir de esto es posible lograr imágenes de objetos particulares pero que no aporta más información que la relacionada a sus dimensiones. Si quisiéramos analizar el comportamiento dinámico del objeto, cuando este es sujeto de excitaciones inducidas, deberemos hacerlo mediante la técnica de doble exposición. Básicamente esta consiste en superponer dos hologramas del mismo cuerpo pero en dos condiciones diferentes, induciendo en una de ellas una deformación que deberá ser en todos los casos del orden de unas cuantas longitudes de onda. Por el contrario si las deformaciones fueran de magnitudes mucho mayores a la

longitud de onda y hasta macroscópicas, estas pueden ser registradas mediante la misma técnica pero la información aportada será diferente. En el primer caso sobre la imagen resultante observaremos la superposición de franjas oscuras y claras las cuales nos indican la magnitud y la forma de la deformación sobre el objeto (Figura 2). En el segundo caso observaremos dos imágenes diferentes del mismo cuerpo, se podría decir que vemos como una sobra, la cual no es más que la imagen del objeto con mayores o menores dimensiones dependiendo del caso. Matemáticamente si queremos definir la formación de la imagen de un holograma de doble exposición con variación de las dimensiones del cuerpo corresponde el siguiente planteo. Cuando el cuerpo O es iluminado por una fuente de luz coherente un punto particular P sobre la superficie de este se dispersa luz en todas direcciones, interesándonos una dirección particular que se dirige hacia el medio de registro. La luz dispersada llega al film F a través del camino óptico H. El haz de referencia $U_r(x,y)$ llega al film mediante el camino óptico de referencia. Si el camino seguido por la luz proveniente del objeto cambia levemente su camino óptico de tal manera que la diferencia sea pequeña entre la primera y la segunda exposición, podemos definir un nuevo frente de onda correspondiente a una nueva condición. Es así que si $O_1(x,y)$ se convierte en $O_2(x,y)$ la imagen final registrada sobre el holograma será una combinación de $U_r(x,y)$, $U_1(x,y)$ y $U_2(x,y)$. Cuando el holograma final es reconstruido, este estará compuesto por la combinación de dos semi-hologramas sobre los cuales aparecerá un patrón de interferencia.

$$O_1(x, y) = a(x, y) \cdot e^{[-j\phi(x,y)]} \quad (2)$$

La ecuación 2 representa la luz proveniente del punto P del objeto antes de introducir un cambio en el volumen del mismo mediante la perturbación. El ángulo $\phi(x,y)$ representa la información asociada a la fase de la onda dependiente de las características del objeto en el punto P.

$$O_2(x, y) = a(x, y) \cdot e^{[-j\{\phi(x,y) + \Delta\phi(x,y)\}]} \quad (3)$$

La Ecuación 3 representa el frente de onda proveniente del punto P luego de haberse producido la deformación del cuerpo, donde $\Delta\phi(x,y)$ representa el cambio en la fase producido por el cambio en el camino óptico debido al cambio en el volumen del objeto.

La formación final de la imagen dependerá de la combinación de los tres frentes de onda sobre la película, expresado por.

$$I(x, y) = |U_1(x, y) + U_2(x, y)|^2 = |2 \cdot \alpha(x, y)|^2 \{1 + \cos[\Delta\phi(x, y)]\} \quad (4)$$

donde $2\alpha^2(x,y)$ es la amplitud del frente de onda asociado a la imagen del objeto y $\Delta\phi(x,y)$ es la diferencia de fase debida al cambio de camino óptico entre ambas exposiciones. Puede observarse que la imagen final queda modulada por el coseno del cambio total de fase lo que originará existan zonas de franjas oscuras y zonas claras sobre la imagen final del objeto. Así cada una de estas franjas está representando un cambio de fase 180° en el camino óptico total.

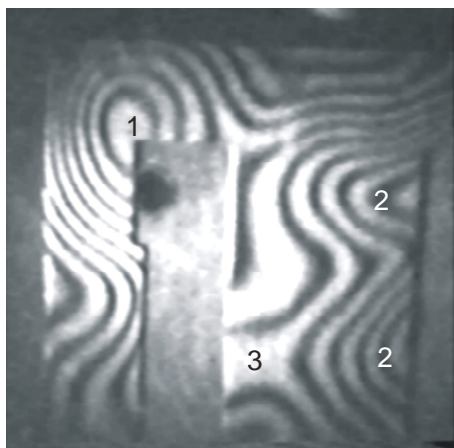


Figura – 2. Imagen resultante de un holograma interferométrico de la parte E de un núcleo de transformador excitado térmicamente, los patrones de franjas claras y oscuras superpuestas a la imagen final representan la deformación sufrida. La zona indicada como 1 representa deformación perpendicular al plano de la pieza.

B. Método de excitación del objeto.

En el párrafo anterior hemos hecho referencia a la forma en la cual un objeto puede ser estudiado mediante la técnica de doble camino óptico y doble exposición. Se ha hecho hincapié en la necesidad de introducir un cambio en las dimensiones del objeto para poder observar su comportamiento. Este cambio puede ser introducido por diferentes métodos, una deformación mecánica directa, variación térmica, vibraciones de frecuencia constante, variación de presión o cualquier forma que permita deformar al cuerpo en una magnitud que no supere la decena de longitudes de onda.

Habitualmente es usada la variación térmica del objeto dada su simplicidad, economía y la posibilidad de medir en forma precisa la temperatura del objeto. Estas variaciones térmicas rara vez superan los 5 °C lo que resulta muy conveniente dado que no se pone en riesgo la integridad de los objetos. En el análisis de estado de conservación de obras de arte, en las publicaciones de referencia, se indica a este como el método más usado en la actualidad. Otros métodos implementados, particularmente para el estudio de pinturas sobre lienzo o madera se basan en la utilización de ondas de sonido emitida por altavoces.

Cualquiera de estas dos técnicas permiten identificar los principales tipos de daños en las obras de arte, desprendimientos, grietas o daños estructurales.

C. La luz como herramienta de restauración.

La radiación electromagnética en la longitud de onda del visible es generada por diferentes fuentes, desde las vibraciones de los átomos debida a su temperatura a interacciones atómicas entre diferentes niveles energéticos. Estas formas de generación de la luz resultan convenientes en iluminación, sin embargo cuando la luz se convierte en una herramienta, no es posible utilizar la luz en sus formas más simples. Particularmente el desarrollo del láser ha permitido que esta radiación deje de tener origen en fenómenos aleatorios y no correlacionados en el tiempo. El resultado es una fuente de luz de muy alta coherencia espacio – temporal e intensidad elevada. Estas dos características le confieren la posibilidad de interactuar con los materiales en diversas formas.

Cuando los niveles de intensidad se elevan el fenómeno de ablación toma preponderancia. Es este proceso el que ha permitido la aplicación a la restauración de obras de arte.

Durante la restauración el restaurador, mediante el empleo de un láser de alta intensidad, procede con la ablación de las capas de polución que se han ido depositando sobre la pieza, el resultado es que los colores y matices vuelven a resaltar tal como se encontraban originalmente.

Sin embargo la utilización del láser en estas prácticas trae aparejado dos problemas fundamentales, un correcto dimensionamiento de los niveles de intensidad y los daños colaterales. Si la intensidad del láser es demasiado elevada para el tipo de polución a ser ablacionada se corre el riesgo de extraer material propio del objeto a ser restaurado. Para esto es posible utilizar la técnica denominada LIBS. Una técnica espectroscópica que permite obtener la composición elemental del plasma que se forma durante el proceso de ablación. Normalmente la polución presenta una composición característica definida por determinados elementos tales como el carbono, mientras que en el objeto se encontrarán otros elementos característicos. Así se procede con la ablación en diferentes niveles de intensidad y se controla la composición, cuando esta cambia se ha pasado de la polución al objeto. Así se determinan los parámetros de trabajo (Intensidad y cantidad de pulsos de láser).

Si bien la técnica LIBS permite controlar el proceso de limpieza no permite definir los daños colaterales que se generan por la utilización del láser. Cuando comienza el proceso de ablación es posible escuchar un estampido característico el cual puede ser usado como técnica de control mediante un análisis espectral del sonido emitido, al igual que la LIBS, sin embargo este estampido tiene origen en una onda de choque que acompaña los procesos de ablación. Se ha podido determinar que el principal daño colateral se produce a partir de este efecto sobre la estructura del material, aumentando en algunos casos el deterioro del objeto.

La holografía interferométrica es entonces la principal herramienta de diagnóstico.

D. La interferometría holográfica como herramienta de diagnóstico.

Como mencionamos anteriormente la holografía puede ser usada como método de diagnóstico que permite determinar la existencia de desprendimientos, grietas y otros daños particulares. En el presente trabajo mostramos los resultados de la aplicación de la técnica de doble exposición aplicada al diagnóstico del estado de conservación de una pintura de principios del siglo XX.

La particularidad de este trabajo es que se utilizó un sistema de excitación del objeto de características especiales, con el fin de reducir posibles daños sobre la pintura.

En la bibliografía de referencia es posible encontrar que como método de inducir un cambio en el objeto suele usarse una lámpara incandescente de alta potencia, la cual mediante radiación genera una elevación de temperatura y la consiguiente dilatación. Nuevamente decimos que como la precisión del método es inferior a una longitud de onda (menos de 632 nm) no es necesario ir mas allá de los 5 °C de variación térmica. Si bien estas diferencias de temperaturas son aceptables o de condiciones normales, la utilización de una lámpara de potencia elevada puede traer inconvenientes por la interacción del material con la longitud de onda del infrarrojo.

Un segundo método ampliamente usado es el de un altavoz que permita mediante ondas de sonido producir la vibración de la superficie. Este resulta un método más amigable pero que trae aparejado la necesidad de calibrar correctamente los niveles de presión que ejerce la onda y el inconveniente de transmitir una onda de sonido en todas direcciones. Dado que la intensidad es elevada puede producir variaciones en las posiciones de los elementos ópticos que integran el sistema.

En todos los casos el resultado es el mismo franjas claras y oscuras que se forman sobre la imagen del objeto. Estas franjas aportan información del proceso de cambio. Si el esquema es montado de tal manera que el ángulo de iluminación del objeto es igual al ángulo de observación, solamente serán vistas las deformaciones que se producen en la dirección perpendicular al plano del objeto y la variación de fase total dependerá de la ecuación 5.

$$\Delta\phi = k\Delta l \approx -\frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta_i + \cos\theta_o)\Delta z \quad (5)$$

Una simulación por computadora nos muestra en la figura 3 como se vería en este caso una deformación puntual en el plano del objeto, tal como la que produciría al ejercer presión en forma perpendicular.

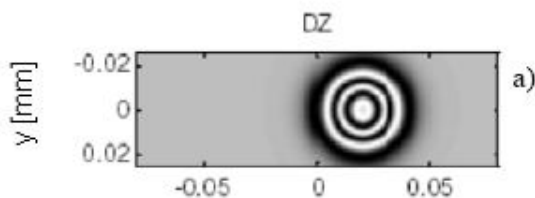


Figura – 3. Simulación por computadora de la deformación resultante de ejercer presión en un punto sobre una lámina plana y elástica.

Esta técnica es particularmente importante para la localización de defectos en obras de arte y la interpretación de las mismas es fundamental. En la figura 3 la zona gris representa el plano del objeto, mientras que las franjas claras y oscuras indican donde se produjo el cambio en las dimensiones del cuerpo bajo estudio. El centro de los círculos indica la zona de mayor deformación.

Cada cambio de una franja clara a una franja oscura representa un cambio de fase de 180° , así en la figura 3 el cambio total de fase sería de 5π y de este valor podríamos encontrar el desplazamiento máximo en z a partir de la ecuación 5.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado es posible utilizar la interferometría holográfica como una importante herramienta de diagnóstico, así sabemos que desprendimientos de pinturas o esculturas tendrían un comportamiento similar al de la figura 3 mientras que grietas o fracturas tendrían a interrumpir las franjas concéntricas. De esta manera sería posible encontrar los puntos críticos para comenzar con los trabajos de restauración.

E – Montaje experimental.

El esquema óptico usado en la experiencia fue similar al mostrado en la figura 1, y que puede ser visto en detalle en la figura 4.

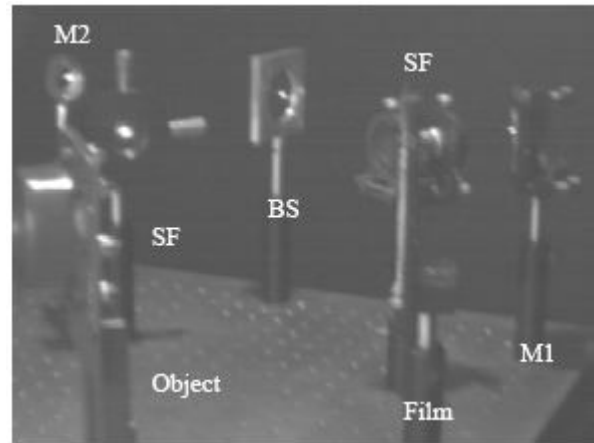


Figura – 4. Montaje óptico experimental usado en el diagnóstico del estado de conservación de una pintura al óleo. M1 y M2 son espejos, los SF son filtros espaciales y BS el divisor de haz.

Para la realización de los hologramas se usó un láser de 10mW de He-Ne no polarizado. Ambos haces el de referencia y el del objeto fueron filtrados con filtros de $5\mu\text{m}$ y $25\mu\text{m}$ respectivamente. Como medio de registro se usó película holográfica Slavich PFG-3 con definición de 3000 líneas por milímetro y el proceso de revelado fue de 4 pasos usando la formulación JD-2.

En el caso de análisis se usó como mecanismo de excitación un pequeño buzzer de frecuencia constante 4.2Khz, el PK12N40PA, al cual puede variarse la intensidad del sonido mediante la limitación de corriente de alimentación. Esta forma de excitación fue denominada excitación localizada del objeto. La principal ventaja es que dada su baja intensidad de emisión y su reducido tamaño, los efectos colaterales pueden ser considerados de menor orden.

Para la utilización de esta forma de excitación fue necesario calibrar el método, para lo cual se utilizó sistema patrón. Este consistió en dispositivo capaz de albergar una membrana parcialmente flexible y de forma circular y que al mismo tiempo permitiera la fijación del elemento de excitación. Este dispositivo se montó como objeto en el esquema holográfico y se le realizaron una serie de hologramas para definir las condiciones de operación del buzzer.

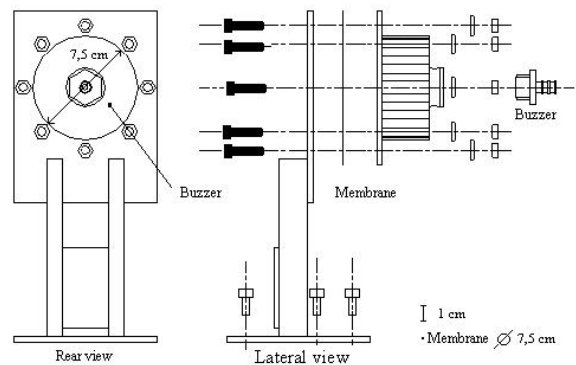


Figura –5. Dispositivo de membrana vibrante desarrollado para la calibración del sistema de excitación.

El primer holograma de la serie fue el denominado holograma patrón, el cual fue realizado con el único objetivo de definir los parámetros propios del holograma. Posteriormente se realizaron hologramas de doble exposición variando los niveles de corriente en el buzzer.

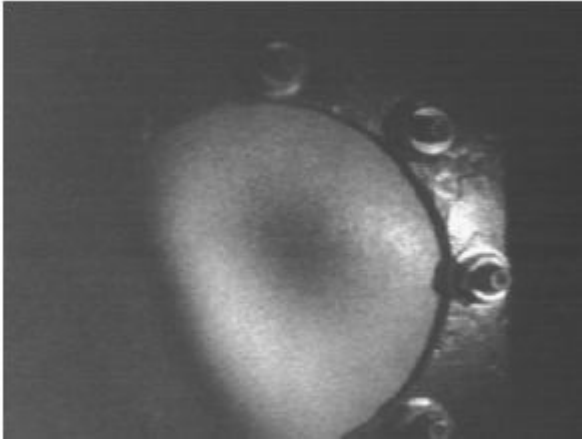


Figura – 6. Holograma de referencia de la membrana, la membrana utilizada corresponde a una lámina de cartón que pueda guardar similitud desde el punto de vista mecánico con el material de soporte de diferentes tipos de obras de arte.

En estos hologramas se busca reconocer los patrones de interferencia que representan la variación en la posición de la membrana, teniendo en cuenta que se trata de vibraciones que alcanzan puntos de excursión máximos y mínimos constantes en el tiempo.

En las figuras 6 y 7 es posible observar dos hologramas interferométricos particulares, en los cuales es posible medir los desplazamientos de la membrana.

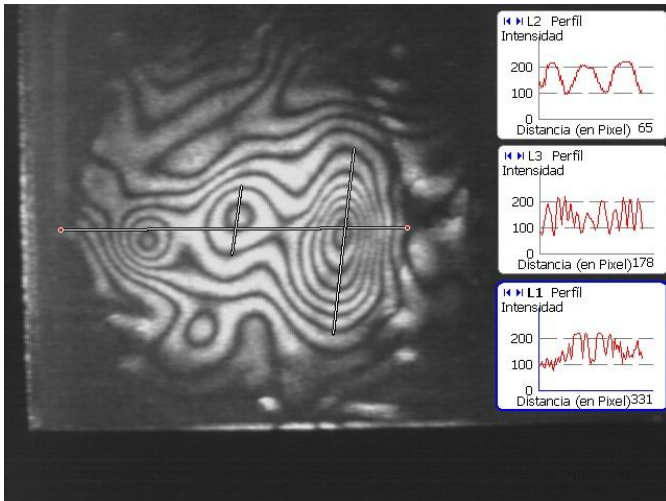


Figura –7. Holograma interferométrico de la membrana de cartón oscilando a 4.2 KHz . El ángulo de observación es cercano al de iluminación por lo cual predominan las deformaciones en el sentido perpendicular. Claramente pueden observarse las zonas antinodales de la membrana.

En la figura 7 con la ayuda de un programa de determinación de perfiles de intensidad de en imágenes (Pixel Profile), se pudo cuantificar la cantidad de franjas correspondientes a cada zona específica. Un mínimo de dos y un máximo de 7 franjas pueden determinarse en cada zona de excursión cuando la corriente circulante por el buzzer fue de 9.1 mA.

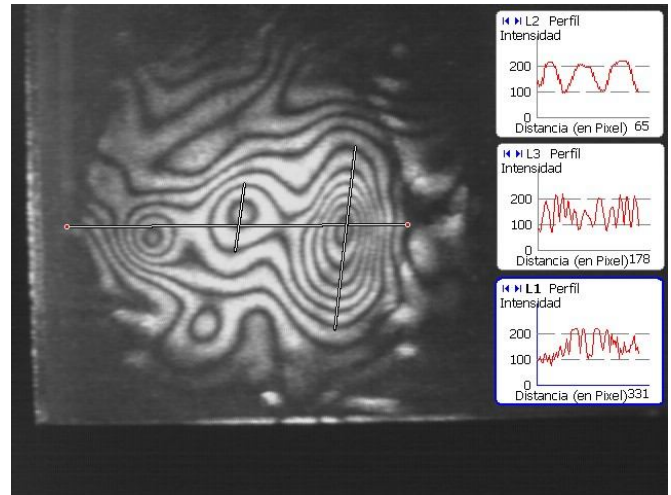


Figura – 8. Holograma interferométrico de la membrana de cartón, pero con una corriente de excitación en el buzzer de 4.6 mA.

En la figura 8 se ha reducido notablemente la corriente circulante por el buzzer y se ha cambiado el ángulo de observación hasta hacerse igual al de iluminación. El resultado es un holograma en el cual pueden observarse diferencias con el anterior en lo que respecta a las magnitudes y zonas de oscilación.

Los hologramas mostrados en las figuras anteriores son solo tres de los 18 hologramas utilizados para la calibración del método, estos demuestran la factibilidad de uso del buzzer como elemento excitador, sin embargo no representan una herramienta que permita detectar problemas en un objeto de interés patrimonial.

Con el fin de observar como se comportaría una pieza que tuviese algún tipo de daño, desprendimiento o grieta, se procedió a realizar el marcado de la superficie del cartón. Sin llegar a cortarlo totalmente, se le realizó una pequeña grieta en sentido vertical. Al excitar la pieza con el buzzer a su máxima intensidad nos encontramos con el resultado documentados en la figura 9.

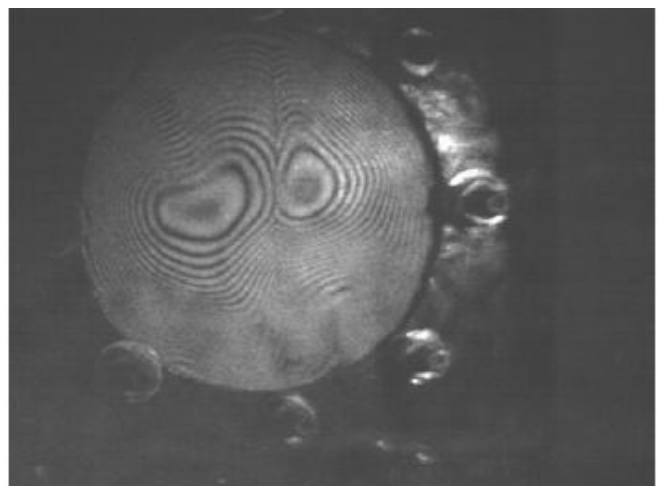


Figura – 9. Holograma de la membrana luego de haberle efectuado un corte vertical.

En esta última claramente puede verse que la membrana ha quedado dividida en dos zonas perfectamente identificables, dado que a cada lado del corte es posible observar la formación de dos zonas antinodales. Además es notable ver las discontinuidades que se producen en las franjas a cada lado de la grieta. Evidentemente este método permite

encontrar claramente donde se encuentra el daño en la superficie del objeto.

D –Caso de estudio.

El caso de estudio es un Vercelli, pintura al óleo realizada a fines de la década del 30 en la ciudad de Milán (Italia) lugar donde habría sido adquirida por el propietario. La misma corresponde a la serie Pesche in Fiore (Durazneros en flor) que el autor habría pintado en aquella década. Hoy las pinturas de esta serie son consideradas de un interés patrimonial medio.

La pintura analizada no presenta un estado de conservación aceptable, dado que es posible observar como la polución se ha ido depositando sobre ella hasta cubrir en gran parte de los colores originales.

Dadas las características, resulta una pieza ideal para ser restaurada mediante un proceso de limpieza por láser, dado que de la simple observación no se encuentran zonas de desprendimientos o grietas.



Figura – 10. El óleo de Vercelli de la serie Pesche in Fiore. Nótese que el árbol ubicado en el centro de la escena es un duraznero florido típica de esta serie.



Figura – 11. Detalle de la polución depositada sobre la pintura, desplazando levemente el marco es posible observar la diferencia de colores y la pátina depositada.

De toda la pintura se seleccionó como área a ser analizada una zona que presentaba una pincelada de mayor grosor que el resto. Dado que el material de soporte es madera se supuso que dicha zona podría ser la más propensa a presentar algún tipo de deterioro.



Figura – 12. Zona de estudio, nótese la mayor deposición de pintura que hace presuponer la posibilidad de existencia de desprendimientos o grietas

Una vez montado el cuadro en el sistema óptico se procedió con el montaje del buzzer en la parte posterior del cuadro. Dado que el mismo en su parte posterior presentaba un cartón de protección, se utilizó este para la fijación del elemento excitador.

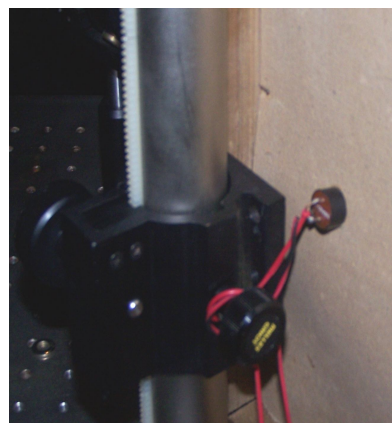


Figura – 13. Montaje del buzzer de excitación en la parte posterior del cuadro.

Un total de 15 hologramas fueron realizados con el fin de realizar un estudio del comportamiento del cuadro.

Los hologramas presentaron una muy mala calidad de imagen, lo que llevó a revisar cada uno de los parámetros de la técnica holográfica. Uno de los aspectos fundamentales fue que la relación entre el haz de referencia y el haz del objeto no respetaba la ecuación número 1. Se concluyó posteriormente que la pintura al óleo o bien la película de polución depositada podrían ser altamente absorbente de la longitud de onda del láser de 632 nm.

De toda la serie de hologramas se pudieron obtener algunas imágenes para su estudio. De estas pudo definirse comportamiento ante la excitación localizada.

El holograma resultante, mostrado en la figura 14, permite observar claramente que la zona bajo estudio no presenta ningún tipo de inconveniente, dado que existen dos zonas antinodales a cada lado de la pincelada y una franja circundante que rodea ambas zonas y bordea el material. Es evidente que mientras los alrededores de la zona bajo estudio entraron en oscilación con la onda de sonido, el punto de interés presento una muy alta rigidez, indicativo de una buena cohesión a la madera de soporte.

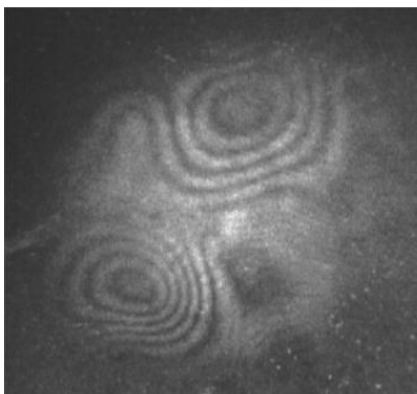


Figura – 13. Holograma interferométrico de la zona bajo estudio correspondiente al cuadro de Verchelli, cuando se usa excitación acústica localizada.

E – Conclusiones.

La luz es una herramienta fundamental tanto en las tareas de restauración como en las de evaluación del estado de conservación de obras de arte. Sin embargo debe ser usada con sumo cuidado dado que la desviación de determinados parámetros asociados a esta, tales como la intensidad, la longitud de onda o los tiempos de interacción luz materia pueden generar efectos adversos.

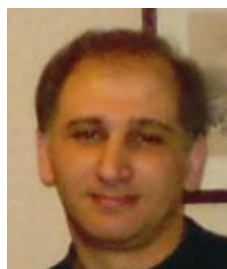
En este trabajo se muestra la aplicación de la interferometría holográfica como técnica de evaluación no destructiva de obras de arte y se presenta una alternativa a la propia luz como mecanismo de excitación de la señal interferográfica que constituye en general una variante más segura que la habitualmente utilizada basada en excitación térmica al tratarse de una forma de excitación más localizada.

Por otra parte el hecho de haber encontrado importantes dificultades en el proceso de análisis holográfico, debido a la longitud de onda de la luz del láser, sienta un antecedente para el comienzo de estudios en longitudes de onda diferentes.

III. REFERENCIAS

- [1] Asmus, J. F., “Non-divestment laser applications in art conservation”, J. Cult. Heritage, 4, 289s–293s, (2003).
- [2] Caufield, H. J., “Handbook of Optical Holography”, Academic Press, San Diego California, Chapter 10, (1979).
- [3] Tornari, V. “Laser interference–based techniques and applications in structural inspection of works of art”, Anal. Bioanal. Chem, 387, 761-780, (2007).
- [4] http://www.hitpoint.tw/electronic/en/product/pk_pf_pl-series/pk-12n40pa.htm.

VI. BIOGRAFIAS



Fabio Miguel Vincitorio, Nació en la ciudad de Paraná Argentina el 21 de enero de 1970. Se graduó de ingeniero en electrónica en el año 1998. Actualmente se encuentra realizando la tesis doctoral en la Universidade Da Coruña (España).

Profesor titular de la cátedra de Física y profesor adjunto de la cátedra de Electrónica de Potencia de la Universidad Tecnológica Nacional.

Autor de publicaciones nacionales e internacionales en electrónica de potencia para iluminación y fotónica aplicada a ensayos no destructivos.

Secretario de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Paraná en el período 2006 - 2010.

Fundador en el año 2004 de la empresa VZ-Ingeniería dedicada a la fabricación y desarrollo de sistemas electrónicos de potencia y control



Ana J. López. Nació en Pobra de Brollón (España) el 25 de junio de 1965. Es Licenciada en Ciencias Físicas por la Universidade de Santiago de Compostela en 1988 y Doctora en Ciencias Físicas por la misma universidad en 1995. Desde 1990 imparte docencia en la Escuela Politécnica Superior de la Universidade Da Coruña (UDC). Es integrante Grupo de

Aplicaciones Industriales del Láser de la UDC donde desarrolla su tarea de investigación.

Es autora de numerosas publicaciones en revistas internacionales en los temas relacionados con el láser y sus aplicaciones. Es además autora de libros y artículos sobre enseñanza de la física. Es y ha sido directora de doctorandos en la UDC.



Alberto Ramil Rego. Nació en Villalba (España) el 27 de junio de 1964. Se graduó como Licenciado en Ciencias por la Universidad de Santiago de Compostela en el año 1987. Recibe el título de Doctor en Ciencias Físicas en el año 1992 por la misma universidad. Es profesor titular en la Escuela Politécnica Superior de la Universidade Da Coruña, de la cual es actualmente director. Es autor de un gran número de publicaciones en revistas y libros en temas relacionados con las

aplicaciones del láser y la física en general. Es y ha sido director de doctorandos en la UDC.

Dynamic laser speckle applied to the analysis of maturation process of irradiated fresh fruits.

F. M. Vincitorio^(a*), N. Budini^(a), C. Freyre^(a), C. Mulone^(a), M. P. Fiorucci^(a), A. J. Lopez^(b), A. Ramil^(b).

^a Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná (UTN-FRP) , Almafuerite 1033, Paraná, Provincia de Entre Ríos , Argentina; ^b Universidade Da Coruña , Escuela Politécnica Superior, Av. Esteiro S/N -Ferrol, España.

ABSTRACT

The treatment of fresh fruits with different doses of ionizing radiation has been found effective for delaying ripening and, in this way, to extend shelf life. This preservation method is likely to produce some functional or constitutive changes in the cellular structure of the fruit. In this work, a test of the effectiveness of fruit irradiation with relatively low doses was performed by using dynamic speckle imaging. Bananas from a same lot were chosen, being a first series of them irradiated with different doses of 0.2, 0.4 and 0.6 kGy (Gy = J/kg) and a second series with doses of 0.2, 0.4, 0.6 and 1 kGy. Non irradiated bananas (0 kGy) were considered as the lot reference for contrast. Irradiation was carried out at the Semi-Industrial Cobalt 60 facility of the Ezeiza Atomic Center, with an activity of 6×10^5 Curie and a dose rate of 28.5 Gy/min. The objective of this work is to analyze differences in the maturation process between irradiated and non-irradiated fruits by means of dynamic speckle pattern evaluation.

Keywords: Dynamic speckle, irradiated bananas, food preservation, mobility index

1. INTRODUCTION

Over the years the dynamic speckle pattern techniques have been applied to the study of many processes in which there is a possibility to observe mobility on the piece under study. This mobility, either shallow (superficial) or inner (interior), generates a change on the intensity distributions that come from the speckle pattern.

Speckle dynamic pattern originates on the phase differences located on the wave front that comes from the reflection of a highly coherent light beam on a rough surface.

The observation of the speckle pattern variations on living cells such as fruit cells is a particular case of study (Rabal, Braga, 2009).

Fruit peel is composed by different cell types, each one with particular sizes and functions.

Pattern analysis must be done through digital processing of the images taken with a CCD camera. There are many different analysis methods on statistical variables that facilitate time correlation in the study.

This work presents the results obtained from an analysis of dynamic speckle patterns of irradiated fruit by applying a new algorithm based on a statistical study of a resultant image matrix.

2. METHODOLOGY

2.1 Irradiation process

Bananas were irradiated inside cardboard boxes, at room temperature, at the Semi Industrial Cobalt-60 facility of the Ezeiza Atomic Center, activity about 600.000 Curies. Radiation doses were measured by Fricke dosimetry, with average dose uniformity = 1.05, and dose rate = 40 Gy/min (Gy= Joule/kg).

2.2 Optical methodology

A 50 mW Helium – Neon Laser was used as a coherent light source. The wave front was amplified and filtered by a 15 μ m spatial filter. The fruit was illuminated directly by the filter without diffusers. A 1 MPix C-MOS camera was used to record sequences of images.

Progressive tests were performed in order to distinguish the cellular behavior of fruits that have been exposed to an irradiation process as a food preservation method. These tests are divided into two series. The first one was performed on a small number of bananas divided into two groups. Group 1 consisted of non-irradiated samples to be used as reference and group 2 consisted of samples irradiated at different doses. Tests performed on series 2 were analogous to those performed series 1, but the number of samples and irradiation doses were increased. Bananas were chosen as the study object because it is possible to extract a large amount of them proceeding from a single plant and, therefore, have the same harvesting date.

Table 1. Classification of specimens and radiation doses.

Series	Samples	Irradiation doses kGy	Radiation source	Analysis
First	8	0 - 0.2 - 0.4 - 0.6	Cobalt 60	D. Speckle
Second	20	0 - 0.2 - 0.4 - 0.6 - 1	Cobalt 60	D. Speckle

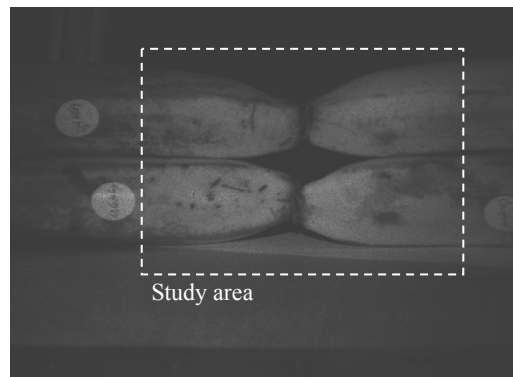
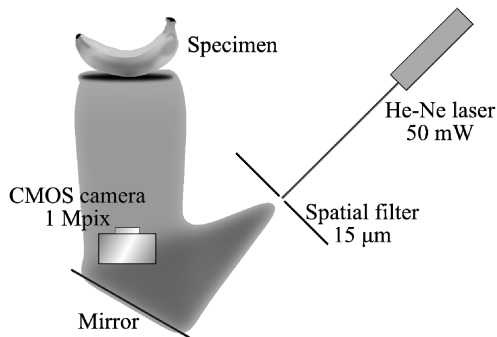


Figure -1. (Left) Experimental setup for image capture. (Right) Photograph of the bananas from series 1 and region of interest for analysis.

Four samples from series 1 were studied simultaneously, arranging them in the same capture frame, in order to ensure the same relative position in front of the camera (see figure 1). However, by using this arrangement it turns impossible two

achieve homogenous light intensity distribution. Therefore, the mobility index of different samples could not be compared.

The same method was used for the analysis of series 2. However, in this case, samples were studied separately in order to avoid the intensity variation.

As the peel darkened made it impossible to observe cell mobility, transversal cuts were performed, dividing the fruit in half. The pieces were studied applying the same method as before. It was noticed that as the irradiation dose decreased the pulp texture showed important changes.

On the second series the same method was applied. To eliminate the intensity variations a new optical topology was designed. The samples were studied separately. On this series the experiment was divided into two groups as well. The first one consisted of five bananas with irradiation doses between 0 and 1 kGy. At first, the observation focused on peel ripening. As it darkened, the dynamic pattern became more difficult to be observed. Therefore a transversal cut was performed on samples and the pulp was analyzed. The second group consisted of fifteen bananas, three for each irradiation dose. Again, transversal cut was performed and the study focused on the pulp. In this series time intervals between photo sessions were of 12 hours, opposed to 24 hours in series one. In addition, a data logger was used to record relative humidity and temperature conditions.

More than 4,000 photos were taken in order to be processed and obtain results with the CECILIA algorithm (Conservation Evaluation by Coherent Illumination and Intensity Acquisition). All RMI (Relative Mobility Index) values were recorded in tables and plotted on linear graphs.

2.3 Processing algorithm

For the analysis of the dynamic speckle patterns, the CECILIA algorithm was developed. This algorithm was recently developed using the Matlab[®] interface. It consists of a digital image capture and a processing tool based on statistical analysis performed on the mobility pattern of the dynamic speckle images. As a prerequisite, it is necessary to take the photographs in a sequence having a well-defined time interval between them. Examples of the image reconstruction from the algorithm implementation can be observed in figure 2. Since it is possible to define a numeric quantity to indicate the degree of variation of speckle pattern with the ripening, the mobility can be quantified. This test studied the ripening process of a fresh strawberry during 24 hours.

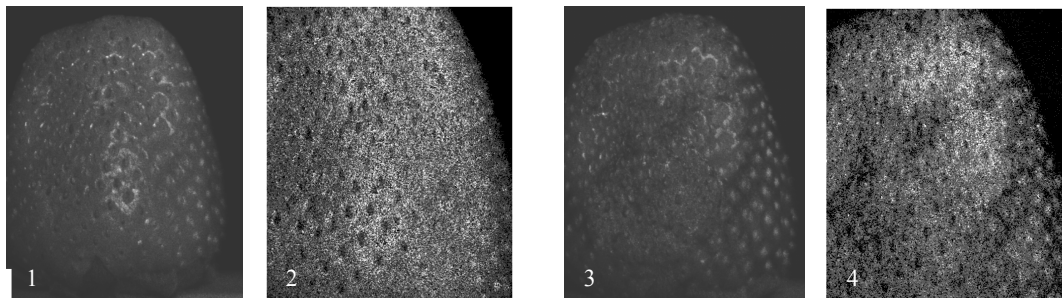


Figure-2. Photograph sequence of a strawberry reconstructed by a CECILIA algorithm. (1) First day image. (2) First day reconstructed image. (3) Second day image. (4) Second day reconstructed image.

Stability of light intensity values is very important for a proper performance of the algorithm, since a linear correlation between the mobility index and the reflected light intensity is observed. Values of the mobility index, obtained from the experiences, lay in the range between 5 and 0.01 in relative mobility units. Each index value is a repeatable average value obtained running the Matlab[®] routine.

The algorithm was designed considering evaluation and narrowing of measurement errors, so that the mobility index obtained can be repeated, as long as the sample's mobility does not change.

3. RESULTS

3.1 First series

On the first experiment four bananas with different radiation doses were studied and the mobility indexes obtained indicated a significant decay. The data adjusts to a decreasing linear function. The linear graphs for the data obtained are shown on figure 3.

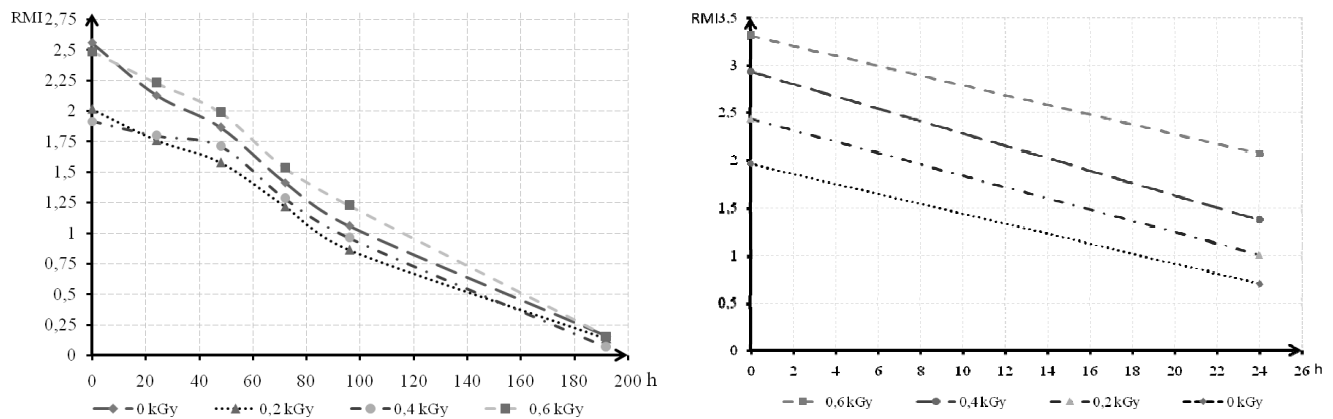


Figure - 3. (a) Mobility relative index decay for different doses in a 200 h time period. (b) Decay of pulp's mobility index during a 24 h period. The major mobility index corresponds to the maximum irradiation dose, while the minimum value was coincident with the non-irradiated fruit.

The second experiment is shown on figure 4, decreasing radiation doses from 1 to 4. In (a), first day, the non irradiated banana (4) looked more deteriorated than any of the irradiated ones. On the second day (b), all samples showed important changes in texture and mobility index.

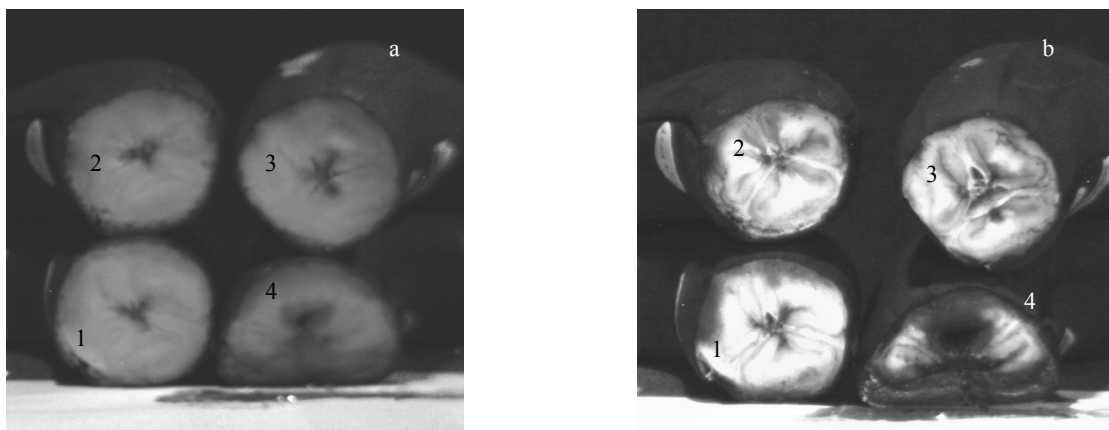


Figure - 4. Photographs of cut bananas from series in the second experiment position. (a) Immediately after being cut and, (b) after 24 h at room temperature. Labels 1 to 4 correspond (clockwise) to decreasing irradiation doses from 0.6 to 0 kGy .

3.2 Second series

On the second series five bananas with different radiation doses were studied and the mobility indexes obtained indicated a significant decay, as observed in series 1. In this case, the data adjusts to a decreasing exponential function. Value deviations noticed in this experiment could be caused by relative humidity variations. The linear graphs for the data obtained are shown on figure 5 and 6.

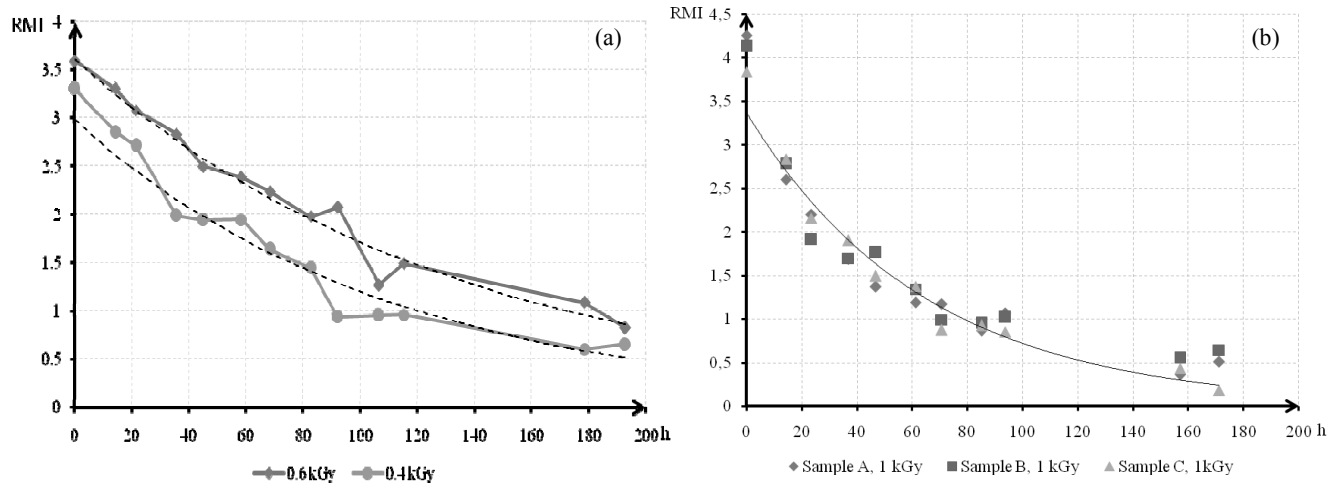


Figure -5. (a) Mobility index evolution on the peel of two samples with different irradiation doses. An exponentially decaying trend can be observed for all specimens. (b) Mobility index evolution on the pulp of three different specimens irradiated with the same dose (1 kGy), in a 7-day time period.

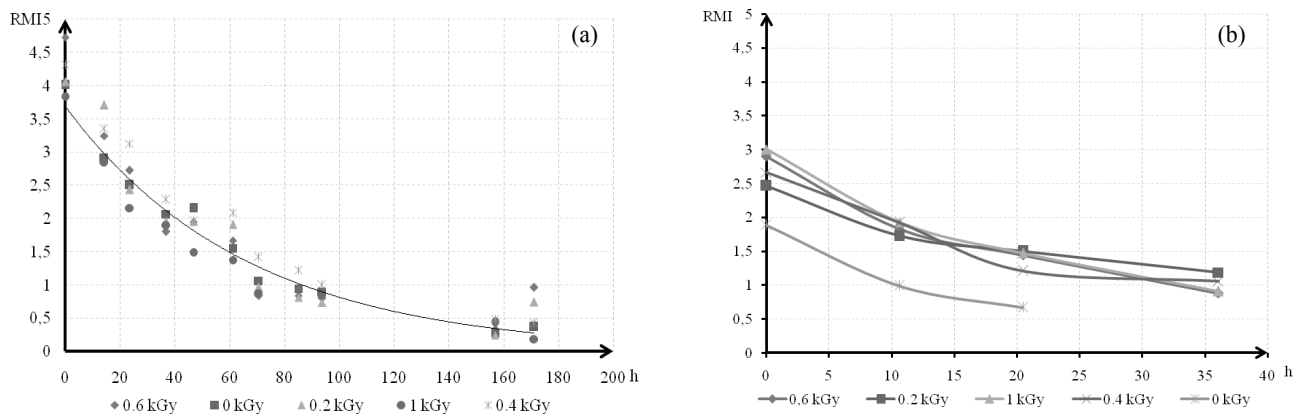


Figure - 6. Mobility index evolution (a) on the pulp of five samples with different irradiation doses between 0 and 1.0 kGy and (b) mobility index evolution on the pulp of samples previously studied with their peel.

4. DISCUSSION

The study documented in this article is the first of a series of experiments planned to find a possible correlation between speckle dynamic patterns and irradiation doses. This work was performed considering a sequence of experiments on two different sets of bananas (series 1 and 2).

From the analysis of the graphs it was possible to observe behavioural differences among samples with different irradiation doses, as previously shown on figures 5 and 6. All samples presented an exponential mobility decay with time. However, the mobility index values do not seem to be strongly correlated with the irradiation doses.

A further important aspect is that, by looking at the values registered on the pulp immediately after cutting the samples of series 1 and 2, about 11 days after irradiation time, a possible correlation is observed. Thus, in the pulp seems to exist a correlation linking mobility index and irradiation dose. However, further experiments with different fruits are needed in order to find a predictable connection between mobility index and irradiation dose.

The data in every graph were adjusted to a decreasing exponential function, as observed on reference sources. Outcomes for different samples with equal irradiation doses are the same, as shown on figure 5 (b).

On the eleventh day since irradiation, the samples with lower doses showed an increase in the mobility index without any apparent reason. Under the same conditions, on the twelfth day a formation of fungal colonies on the pulp was registered. These results point to an increase in the mobility of speckle pattern owing to fungal activity.

5. CONCLUSION

In this work, a new processing algorithm was introduced, based on the statistical analysis of a sequence of photographs taken at regular time intervals. The results of the proposed method have been verified by comparison with results obtained in experiments performed on non-irradiated fruits (0 kGy) from existing literature sources.

As a first result, there appears to be a correlation between the irradiation dose and the mobility index in the pulp when exposed to the environment, after the peel reached its maximum maturity point.

ACKNOWLEDGEMENTS

The contributions of P. Narvaiz and M.C.Cova (CONAE) and the Irradiation Cobalt-60 Facility Division and the High Dose Dosimetry Section of the Ezeiza Atomic Center are gratefully acknowledged.

REFERENCES

- [1] Rabal, H. J. and Braga R. A., [Dynamic Laser Speckle and Applications], CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton Fl. 181-220 (2009).
- [2] Da Silva, E. A., [Estudo das Propriedades do Biospeckle e Suas Aplicações], Dissertação Apresentada ao Instituto de Física da USP. Universidade de São Paulo, 2007.
- [3] Faccia P.A, Pardinia O.R., Amalvya J.I., Cap N, Grumelc E.E., Arizaga R., Trivi M. "Differentiation of the drying time of paints by dynamic speckle interferometry".Progress in Organic Coatings 64, 350-355, Elsevier (2009).



Two simple methods for overall determination of mobility in dynamic speckle patterns



N. Budini^{a,b,*}, C. Mulone^a, F.M. Vincitorio^a, C. Freyre^a, A.J. López^c, A. Ramil^c

^a Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, Avda. Almagro 1033, E3100XAI Paraná, Argentina

^b Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química, UNL-CONICET, Güemes 3450, S3000GLN Santa Fe, Argentina

^c Universidade da Coruña, Centro de Investigacións Tecnolóxicas, Campus de Esteiro S/N, 15403 Ferrol, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 December 2012

Accepted 18 May 2013

Keywords:

Speckle

Dynamic speckle

Mobility

Biospeckle

ABSTRACT

In this work, we present two simple methods to quantify the mobility of dynamic speckle patterns. The first method is based on the averaged pixel intensity differences between subsequent frames, while the second simply counts the fraction of pixels whose intensity changes with time in more than a certain quantity related to background noise. We have analyzed the applicability of these methods to different specimens (inorganic and biological) and compared the results to check their validity.

© 2013 Elsevier GmbH. All rights reserved.

1. Introduction

Speckle patterns formed by illuminating objects with a coherent light source are known to possess information about the object itself at a scale below that of the wavelength used (usually called interferometric precision) [1]. The variation or evolution of a pattern with time, i.e. a *dynamic* speckle pattern, allows further analysis of the object in the temporal domain [2]. A dynamic speckle pattern generally looks like “boiling” and its degree of activity is what we call, from now on, the speckle mobility (SM). If the object under study is of a biological kind, then the dynamic speckle pattern observed receives the name of *biospeckle*. In this case, the SM is termed biospeckle activity (BA) due to its relation to the biological activity of the specimen under investigation [3]. The quantification of BA is being increasingly investigated as a quality-control parameter for fruits and vegetables [4]. It has been generally observed that aging, bruising, infection or any other defect of fruits or vegetables are correlated with a diminished BA index [2]. However, a clear understanding, a consistent explanation and a standardized method to quantify this phenomenon are still lacking.

Commonly, in order to quantify and analyze the SM or the BA index of different specimens, the autocorrelation of the irradiance as a function of time is one of the employed methods [5,6]. However,

there exists a wide variety of approaches such as the quantification of the speckle pattern's time history (THSP) by means of different descriptors like the inertia moment (IM) [3,7–10], the generalized differences (GD) method [11], the modified time correlation method [12], the time evolution inspection of the speckle pattern's texture [13–15], the contrast imaging method [16,17], the method of empirical mode decomposition [10,18], the Fujii difference method [19] and the analysis of the speckle pattern's phase evolution [20], among others. In the case of the Fujii and the GD methods, both of them provide a matrix of SM or BA values and not a single quantity or mobility index as is generally desired. Also, the resulting values of these methods are dependent upon eventual changes of the background illumination level, for which the Fujii method has a better performance. In turn, the IM method does provide a single value but is generally too sensitive to slight changes in the speckle pattern (even to noise) and, thus, any time-elapsing analysis becomes quite noisy. Besides this, the calculation of the IM index requires selecting a small portion (a row or a column) of the entire image which might not be representative of the object under study.

In this work we propose two different simple algorithms (which we call methods I and II from now on) for calculating the SM or BA index, aiming to overcome the mentioned disadvantages of the Fujii, the GD and the IM methods. Particularly, method I also allows reconstructing the image of the analyzed specimen in which different levels of SM or BA can be detected (similarly to Fujii or GD methods). We present the results obtained after applying these methods to some test cases in order to analyze the usefulness and trustiness of the developed algorithms.

* Corresponding author.

E-mail address: nbudini@intec.unl.edu.ar (N. Budini).

2. Experimental

In order to test and validate the proposed algorithms we have used a standardized speckle recording experimental setup, which can be seen in Fig. 1. The sample under study is illuminated with a 30 mW He–Ne laser beam ($\lambda = 632.8$ nm), expanded by a 15 μ m spatial filter. The resulting subjective speckle pattern is recorded by a 1-megapixel CMOS camera. In this way, the time evolution of the speckle pattern (biospeckle, in case of a biological specimen) can be digitally recorded. All images are digitally treated at an 8-bit grayscale resolution, i.e. the intensity of each pixel ranges from 0 (black) to 255 (white). The elapsed time analysis can be characterized by three parameters: (1) the number of frames, $N (\geq 2)$, used to calculate the SM index at a given instant, (2) the period of time between those N frames, τ , whose lower limit is given by the highest temporal resolution attainable by the camera, generally much greater than the dynamic speckle correlation time ($< 10^{-4}$ s, typically) [21], and (3) the period of time, t , between subsequent calculations of SM. Hence, each instant at which the calculation is performed has a finite temporal extension

$$\Delta\tau = (N - 1)\tau \quad (1)$$

between the first and the last frame. This is also schematized in Fig. 1. Obviously, the condition $\Delta\tau < t$ must hold in order to make a valid analysis, i.e. without overlapped frames.

Image acquisition and analysis were performed by means of MATLAB® routines, specifically developed for this work.

3. Description of the methods

3.1. Method I

The first algorithm is based on both the generalized differences (GD) [11] and Fujii [19] methods. In GD, the SM is simply characterized by means of the following mathematical operation:

$$I(i, j) = \sum_{k=1}^{N-1} |I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)| \quad (2)$$

where $I(i, j)$ is the (i, j) component of the resulting BA matrix, N is the number of frames and $I_k(i, j)$ is the (i, j) component of the

k -th image. The Fujii method, introduces a denominator of the form $|I_{k+1}(i, j) + I_k(i, j)|$ to the sum of Eq. (2) in order to compensate for fluctuations of the illumination level during image acquisition. Our first method consists on averaging the differences of Eq. (2). Mathematically this is expressed as

$$I(i, j) = \sum_{k=1}^{N-1} \frac{|I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)|}{N - 1} \quad (3)$$

and is equivalent to inspecting how different, on average, is each image as compared to the next one in the time sequence. This gives as a result a new image, I , which serves both as a SM map and as a reconstruction of the specimen image in a similar way of Fujii and GD methods. To get a single SM index and quantify the general degree of mobility of the dynamic speckle pattern, the values corresponding to each pixel of the image emerging from Eq. (3) are also averaged. This can be expressed as

$$\begin{aligned} SM_I &= \frac{1}{mn} \sum_i^m \sum_j^n I(i, j) \\ &= \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} \sum_i^m \sum_j^n |I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)| \end{aligned} \quad (4)$$

where SM_I stands for the SM index resulting from method I and m and n are the number of rows and columns of I , respectively. Hence, the SM_I index measures the image-to-image area averaged pixel intensity changes. This procedure resembles the temporal difference method proposed by Martí-López et al. [22] but differs from it in the averaging step over the whole set of N images from which the SM_I index is extracted, as stated in Eq. (3).

3.2. Method II

Our second method simply measures the average fraction of pixels whose intensity changes as a function of time from image to image in more than a certain amount, which we call *speckle noise*. If a speckle pattern is ideally static, i.e. if there is no mobility at all, this fraction would be obviously zero. In the real case, each speckle pattern, whether static or dynamic, is affected by some degree of noise coming from different sources (vibrations, ambient dust, electronics, thermal fluctuations, and so on). It is possible to inspect the amount of noise of the acquisition system by measuring the variation of pixel intensity in a speckle pattern which is known that should be static. In this way, we estimate the noise level, r , by means of taking the maximum absolute intensity variation between the N images used to calculate the SM index. Mathematically this can be expressed as

$$r = \max(|I_{k+1}^{static}(i, j) - I_k^{static}(i, j)|) \quad (5)$$

where k covers all possible values from 1 to $N - 1$ and i and j cover all m rows and n columns of each image, respectively. The “static” superscript makes reference to the fact that this calculation has to be performed on a sequence of N images of a speckle pattern that is supposed to be static. In practice, it suffices to make the calculation of Eq. (5) in a region of the images under analysis that should not change with time. Once the noise level is known, the algorithm proceeds by (i) calculating the $N - 1$ differences $|I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)|$ as in method I, (ii) counting the amount of pixels whose intensity varies in more than the threshold value r and (iii) averaging this quantity. This operation can be expressed concisely as

$$SM_{II} = \frac{1}{mn} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Theta[|I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)| - r] \quad (6)$$

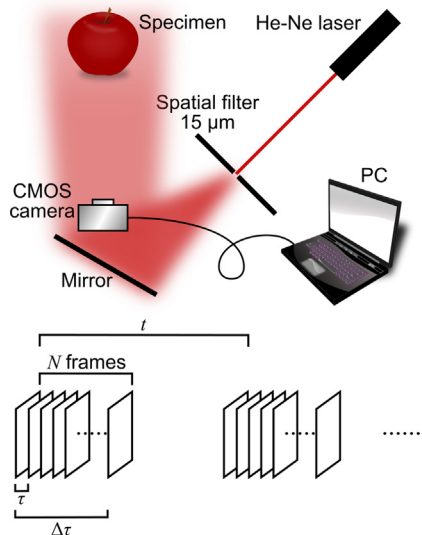


Fig. 1. Standard experimental setup used to acquire the speckle image sequence. A spatially filtered He–Ne laser beam illuminates the sample under analysis and a CMOS camera captures the generated speckle patterns.

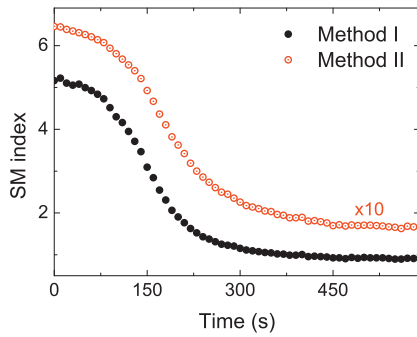


Fig. 2. Time evolution of the net SM_I and SM_{II} values for the nail polish. SM_{II} values were rescaled ($\times 10$), so both curves fit in the same graph. The data points clearly follow a decreasing sigmoidal curve, reaching a constant value when the nail polish dries.

where SM_{II} stands for the SM index resulting from method II, the scaling factor $(mn)^{-1}$ transforms the obtained quantity to the desired area fraction of varying pixels and $\Theta(x)$ is the well-known Heaviside function, defined as

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

4. Results and discussion

In order to analyze the performance of both methods, we have selected different test cases. Firstly, we sought for a specimen underlying some transformation in which we could anticipate that the SM index should decay with time. A phenomenon where this condition is clearly satisfied is, for example, the drying of paint. Hence, we have analyzed the drying of a generic nail polish. As a first experience we fixed the image acquisition parameters to $N = 10$ frames, $t = 10$ s and $\tau = 1$ s, where this latter value is the greatest possible in order to satisfy the condition $\Delta\tau < t$. The corresponding evolution with time of the resulting net SM_I and SM_{II} values is presented in Fig. 2. The values corresponding to method II were rescaled ($\times 10$), so the evolution for both methods fits in the same graph (we recall here that the SM_{II} index lies in the range between 0 and 1). The data points clearly follow a decreasing sigmoidal curve, reaching constant values when the polish dries. These values correspond to the speckle background mobility level as detected by each method, and in some way give an idea of each method's sensitivity.

Fig. 3 shows the corresponding normalized curves of Fig. 2. Normalization to the respective maximum values was performed in order to further compare both methods.

By inspecting these curves, one is tempted to estimate how much time would take the nail polish to dry. At a first glance, it seems appropriate to extrapolate the almost linear part of the

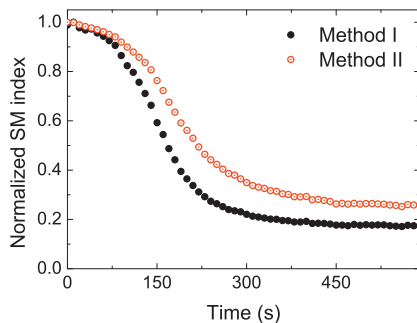


Fig. 3. Further comparison between the curves of Fig. 2, which were normalized to their corresponding maximum values.

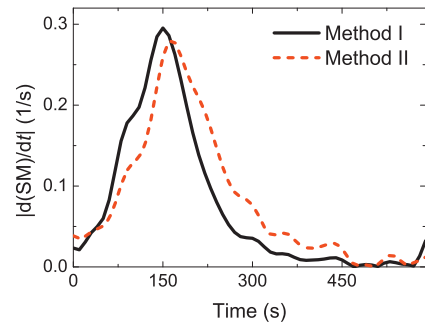


Fig. 4. Absolute value of the SM index's rate of change, $|d(SM)/dt|$, obtained from the curves presented in Fig. 2. Both methods have a maximum rate of change at almost the same time and decrease to zero simultaneously for times above 300 s, when the nail polish dries.

decaying curve until intersecting the time axis. By doing this, we got periods of approximately (282 ± 10) and (370 ± 15) s for methods I and II, respectively. A moderate to high discrepancy of 30% is observed between both values, averaging to about (320 ± 12) s. Besides this, by analyzing the absolute value of the SM index's rate of change, i.e. $|d(SM)/dt|$, we observed that both methods present similar behaviors as shown in Fig. 4.

The curves are quite similar and present a maximum at almost the same time, differing by only 15 s. Also, the rate of change of both methods approaches to zero for times slightly above 300 s, where the drying process of the nail polish can be considered as completed. This value is quite similar to the average of the estimated drying times derived from methods I and II by means of extrapolating the linear portion of the curves. Therefore, despite the difference between the SM values obtained, the rate of change can be considered as being the same in both cases.

We have also checked the proper functioning of the algorithms and the validity of the results by comparing the obtained evolution curves with those obtained by, for example, the IM method. This method consists in selecting a single row or column of the dynamic speckle images to conform the time history speckle pattern (THSP) for that region. Subsequently, a 256×256 elements co-occurrence matrix (CO) is calculated in which the (i, j) component value equals the amount of times that the j gray value follows the i gray value in the THSP. Finally, the speckle activity value is calculated as the moment of inertia of the co-occurrence matrix as

$$IM = \sum_{i,j} CO(i, j)(i - j)^2 \quad (8)$$

In Fig. 5 we present an example of the evolution curve obtained for the SM index by this procedure, from the constructed THSP figures of a test sample with a clear decreasing mobility as a function of time.

In turn, in Fig. 6 we present the time evolution of the IM values for the drying nail polish under study. The calculated values result quite noisy, but the data points oscillate around a typical sigmoidal curve which was fitted by a least-squares procedure and is presented as a guide to the eye. The inset compares this curve, after being normalized, to those fitted analogously to the normalized data points obtained by methods I and II. All curves present the same decreasing trend, which indicates that the proposed algorithms represent quite adequately the overall mobility in the dynamic speckle pattern of the specimen under study.

As other test cases we have selected two biological specimens: an apple and a strawberry. Now, for biological specimens, we use the names BA_I and BA_{II} instead of SM_I and SM_{II} , respectively. Both fruits were left at room temperature during observations. In the case of the apple, we proceeded to cut it in a half and focus the camera to a region of its pulp. The acquisition parameters were

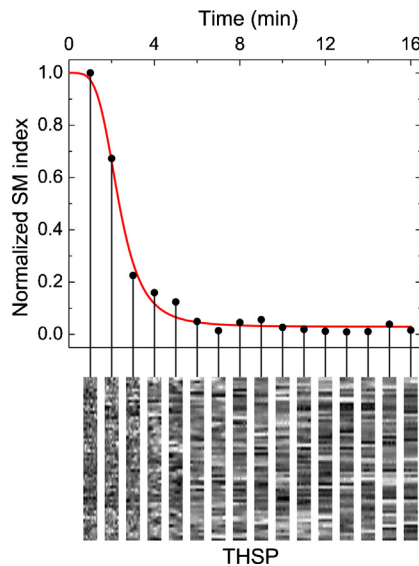


Fig. 5. Example of the evolution curve for the SM index of a test sample calculated by the IM method. The sequence of images shown below corresponds to the THSP matrices for each point, from which the SM index is obtained.

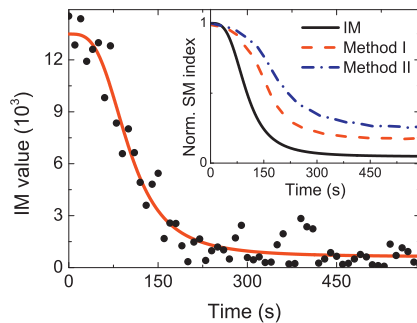


Fig. 6. Time evolution of the SM values obtained by the IM method for the drying nail polish. The data points result quite noisy, but oscillate around a sigmoidal curve. The curve was fitted by a least-squares procedure and is presented to guide the reader's eye.

$N=10$ frames, $t=300$ s and $\tau=1$ s, therefore the condition $\Delta\tau < t$ is more than satisfied. Fig. 7 presents the normalized curves of the time evolution of BA_I and BA_{II} indexes of the apple, obtained by both methods. The exponentially decaying trend is attributed to a mixture of the oxidizing and drying processes that the pulp undergoes when exposed to air. Both methods show the same behavior of the apple's pulp.

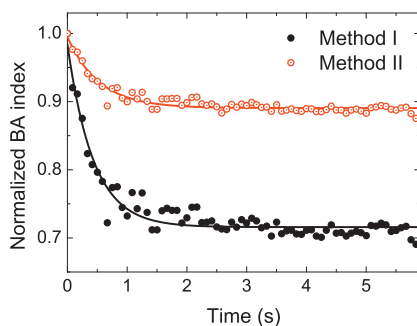


Fig. 7. Normalized curves of the BA_I and BA_{II} indexes obtained for the apple's pulp. An exponentially decaying trend is observed on both curves, which is attributed to a mixture of the oxidizing and drying processes undergoing on the pulp when exposed to air.

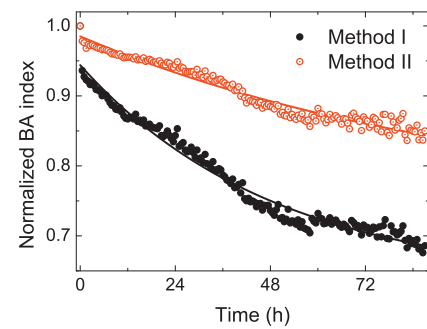


Fig. 8. Time evolution of the curves obtained by methods I and II in the case of the strawberry. The data points also follow an approximate exponential decay. It is worth noting that the points oscillate around the fitted curve. This behavior is attributed to periodic oscillations of humidity during the observation, since it covers both day and night hours.

The strawberry was analyzed with the acquisition parameters $N=10$ frames, $t=30$ min and $\tau=1$ s during a period of 87 h (≈ 3.5 days). The time evolution of the curves obtained by both methods is presented in Fig. 8. Despite the fact that the data points also follow an approximate exponential decay, it is worth noting the presence of some kind of oscillation around a mean curve. We attribute this behavior to periodic oscillations of room temperature and/or humidity during the observation's lapse time, since it covers both day and night hours.

As can be evidenced from the above results, the proposed methods correctly represent the mobility variations of the dynamic speckle patterns for different specimens (biological or not). For the nail polish case we obviously expected the SM index to decay with time, and this assumption was in accordance with the results. For the biological specimens, we also expected a decaying BA index but with some degree of random behavior due to the stochastic nature of biological processes. Thus, we could also confirm this latter assumption by means of the proposed methods. The complex phenomena involved in biological specimens, translated in speckle pattern mobility under coherent illumination, are not easily describable in terms of their relation with physical parameters. However, we have found a clear correlation between the BA indexes, calculated by methods I and II, and humidity. A detailed analysis of this and other possible correlations exceeds the aim of this work and will be addressed in future works.

5. Conclusion

We have presented two simple methods for calculating the overall speckle pattern mobility of a sequence of images acquired by a standard CMOS camera. After a detailed description of the ideas behind each method and of the required calculation steps, we proceeded to analyze some selected test cases. At first, we analyzed the evolution of SM in an inorganic sample with a predictable outcome, i.e. the drying of a commercial nail polish. This test case served us to inspect several aspects of the algorithms in order to improve them from their origin, until reaching the final form presented in this work. However, further improvements might be introduced after application of the methods to different specimens. As presented, the methods proved to correctly describe the expected trends of speckle pattern's mobility for the selected test cases. Besides this, after comparing the curves of the nail polish with that obtained by the well-known IM method we could check the validity of the results. Concerning the biological specimens, an apple and a strawberry, we also observed a decaying trend of the BA values, but with some degree of randomness attributed to the stochastic nature of biological processes. This is in accordance with previous knowledge about BA of fruits. In the case of the strawberry, analyzed during

more than three days, we have detected a clear correlation between BA and humidity. However, this latter point will be addressed in future research. The proposed methods are based on simple and logic assumptions, are simple to implement and describe correctly the evolution of the overall speckle pattern mobility of selected test cases.

Acknowledgments

This work was funded by joint projects from Universidad Tecnológica Nacional and CONICET, of Argentina, and Universidade da Coruña, of Spain.

References

- [1] R. Jones, C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge UK, 1989.
- [2] H.J. Rabal, R.A. Braga Jr., *Dynamic Laser Speckle and Applications*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Ratón, FL, USA, 2009.
- [3] R.A. Braga Jr., B.O. Silva, G. Rabelo, R.M. Costa, A.M. Enesa, N. Cap, H.J. Rabal, R. Arizaga, M. Trivi, G. Horgand, *Opt. Laser Eng.* 45 (2007) 390.
- [4] A. Kurenda, A. Adamiak, A. Zdunek, *Postharvest Biol. Technol.* 67 (2012) 118.
- [5] Y. Aizu, T. Asakura, *Opt. Laser Technol.* 23 (1991) 205.
- [6] B. Ruth, *J. Mod. Opt.* 34 (1987) 257.
- [7] A. Oulamara, G. Tribillon, J. Duvernoy, *J. Mod. Opt.* 36 (2000) 165.
- [8] R. Arizaga, M. Trivi, H.J. Rabal, *Opt. Laser Technol.* 31 (1999) 163.
- [9] R.A. Braga, W.S. Silva, T. Sáfadi, C.M.B. Nobre, *Opt. Commun.* 281 (2008) 2443.
- [10] A. Federico, G.H. Kaufmann, *Opt. Commun.* 267 (2006) 287.
- [11] R. Arizaga, N. Cap, H.J. Rabal, M. Trivi, *Opt. Eng.* 41 (2002) 287.
- [12] J.A. Pomarico, H.O. DiRocco, *Rev. Sci. Instrum.* 75 (2004) 4727.
- [13] M. Fernández, A. Mavilio-Núñez, H.J. Rabal, M. Trivi, *App. Opt.* 41 (2002) 6745.
- [14] A. Mavilio-Núñez, M. Fernández, M. Taño, H.J. Rabal, R. Arizaga, M. Trivi, *Opt. Eng.* 46 (2007) 057005.
- [15] A. Mavilio-Núñez, M. Fernández, M. Trivi, H.J. Rabal, R. Arizaga, *Signal Process.* 90 (2010) 1623.
- [16] J.D. Briers, *Opt. Quant. Electron.* 10 (1978) 364.
- [17] J.D. Briers, S. Webster, *J. Biomed. Opt.* 2 (1996) 174.
- [18] S. Equis, P. Jacquot, *Strain* 46 (2008) 550.
- [19] H. Fujii, K. Nohira, Y. Yamamoto, H. Ikawa, T. Ohura, *App. Opt.* 26 (1987) 5321.
- [20] H.J. Rabal, N. Cap, M. Trivi, R. Arizaga, A. Federico, G.E. Galizzi, G.H. Kaufmann, *App. Opt.* 45 (2006) 8733.
- [21] P. Zakharov, A.C. Völker, M.T. Wyss, F. Haiss, N. Calcinaghi, C. Zunzunegui, A. Buck, F. Scheffold, B. Weber, *Opt. Expr.* 17 (2009) 13904.
- [22] L. Martí-López, H. Cabrera, R.A. Martínez-Celorio, R. González-Peña, *Opt. Commun.* 283 (2010) 4972.

Detection of fungi colony growth on bones by dynamic speckle

F. M. Vincitorio^{a,*}, N. Budini^{a,b}, C. Mulone^a, M. Spector^a, C. Freyre^a, A. J. López Díaz^c, A. Ramil^c

^aUniversidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná. Avda. Almafuerce 1033, E3100XAI, Paraná, Argentina;

^bInstituto de Física del Litoral (CONICET-UNL), Güemes 3450, S3000GLN, Santa Fe, Argentina;

^cUniversidade Da Coruna, Escuela Politécnica Superior, Av. Esteiro S/N, Ferrol, Spain.

ABSTRACT

In this work we have studied the dynamic speckle patterns of mucor fungi colonies, which were inoculated on different samples. We were interested in analyzing the development of fungi colonies in bones, since during the last two years, a series of infections by mucor fungi have been reported on patients from different hospitals in Argentina. Coincidentally, all of these infections appeared on patients that were subjected to a surgical intervention for implantation of a titanium prosthesis. Apparently, the reason of the infection was a deficient sterilization process in conjunction with an accidental contamination. We observed that fungi growth, activity and death can be distinguished by means of the dynamic speckle technique.

Keywords: Fungi, mucor, dynamic speckle, prosthesis, speckle mobility

1. INTRODUCTION

Dynamic speckle pattern techniques have been applied to study different kind of samples for which the patterns present some kind of temporal variation, generally called speckle mobility (SM) or activity. This mobility is particularly observed in biological samples, and its random behavior makes the speckle pattern appears as boiling.¹ In this kind of samples, speckle variations are due to cell or biological activity. Depending on the wavelength of the light used for illumination, the observed variations are due to either shallow or inner biological activity that generates a change on the intensity distributions of the speckle pattern. For example, in the case of apples illuminated with a wavelength near 700 nm the observable depth is around 2 mm.²

It has been demonstrated that fungi also presents a dynamic speckle pattern when illuminated with a laser.³ During the last two years, a series of infections by mucor fungi have been reported on patients from different hospitals in Argentina. The common denominator of all these infections has been, remarkably, a surgical intervention in which a titanium prosthesis was implanted and the main hypothesis points towards a deficient sterilization process in conjunction with an accidental contamination.

The members of mucor species are known as contaminants in some cases, but are very rarely considered as etiologic agents. They are usually not pathogenic, although some species might cause a type of infection known as mucormycosis on tissues.⁴ When this agent colonizes bones on a human body, the direct consequence is a necrosis. As a result, a long and expensive drug treatment and multiple surgical practices are required to avoid amputation.

Hence, in this work we have analyzed the possibility of detecting an incipient fungi colony on different samples, by means of dynamic speckle, even before these colonies can be detected by optical microscopy or by simple visual inspection.

There are several methods to analyze the temporal evolution of dynamic speckle patterns.^{3,5-7} All of them are based on processing a sequence of speckle pattern digital images acquired with a CCD or CMOS camera. However, in this work we have developed and employed a simple new algorithm whose results have been already proved experimentally.⁸

*Corresponding author e-mail: fisicaelectronica@frp.utn.edu.ar. Phone/fax +54-343-4243054

2. METHODOLOGY

We have studied several samples by means of dynamic speckle evaluation, which have been inoculated with mucor spores at different growth stages just by simple contact. Five different pork bones were used to study the speckle activity of fungi colonies during their growth and death processes. In this way, one can roughly emulate a human bone which gets infested during contact with a titanium prosthesis. As a reference sample of a culture medium we used gelatine, where we have isolated fungi to analyze their growth.

2.1 Description of samples under study

2.1.1 Pork chop: samples 1, 2 and 3

Three pork chops were isolated on different Petri dishes, being previously put in contact with fungi spore. Each capsule was hermetically sealed. After that, we delimited three zones or regions of interest to study samples 1 and 2 marked with a grid as reference. On sample 3 we only selected two regions of interest. These regions were also subdivided by tissue type (bone, fat and flesh) as is shown in Fig. 1.

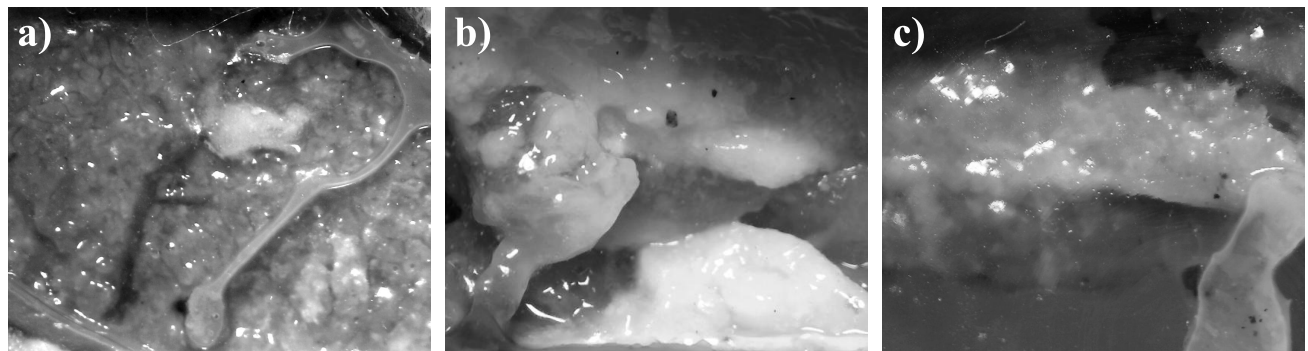


Figure 1. Three different tissues were selected for analysis (a) bone, (b) fat and (c) flesh.

The images were acquired in sequences of ten photographs separated by a 24 h time period, i. e. the first day we took a sequence of ten photographs, the second day at the same time we took another sequence, and so on. The images of each sequence were taken at a 1 s interval.

2.1.2 Pork bone: samples 4 and 5

We also used two different bones infested by mucor fungi at an advanced growth state. In both cases, fungi were located inside the bone, whose marrow was previously removed, and the appearance of fungi colonies was filamentous (see Fig. 2). These colonies were more than five days old at the starting time of the dynamic speckle acquisition experiment.

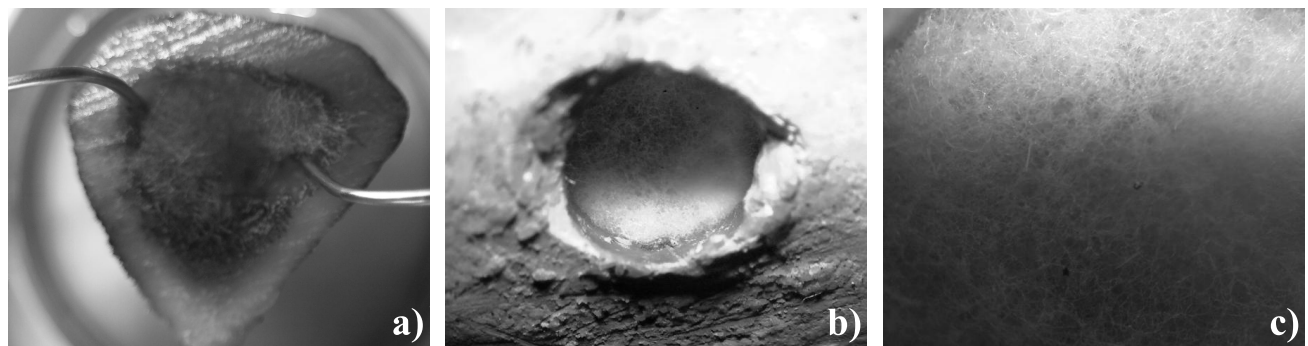


Figure 2. Photographs of (a) sample 4, transversal cut of pork bone infested by mucor, (b) detail of the filamentous appearance of fungi inside a hole in the bone, (c) fungi in sample 5 observed through a magnifying glass at a magnification factor of 16.

For sample 4 we performed a first experiment to study the evolution of mucor colonies. As before, sequences of ten pictures separated by 1 s were acquired to analyze the SM every half hour, during a total time of 77 hours.

2.1.3 Reference sample: gelatine

We prepared a reference sample inside a Petri dish using gelatine, as shown in Fig. 3. Fungi were inoculated on it while being in their spore state. Samples were kept on the same position of the optical system. From the first to the fourteenth day the Petri dish was kept closed, and we removed its cover only when the images were taken.



Figure 3. Photographs of fungi (a) grown on the reference gelatine sample, (b) and (c) are amplified details of their filamentous aspects taken with a magnification factor of 30.

2.2 Optical system

We have implemented a simple optical system to capture a sequence of digital photographs of dynamic speckle patterns. Two solid state lasers and an electronic stereoscopic magnifying glass were employed to illuminate and observe both the samples and their speckle patterns, respectively. Lasers were used without the front lens in order to have diverging illumination wavefronts, and the wavelengths were of 532 nm (green) and 650 nm (red). Speckle images were acquired through an internal CMOS camera of the magnifying glass connected to a personal computer.

In this way, we expected to detect the presence of fungi on bones and evaluate their growth and death periods.

2.3 Image processing algorithm

For the analysis of the dynamic speckle patterns we used a simple computer algorithm developed in the MATLAB® interface. It is based on both the generalized differences (GD)⁶ and Fujii⁵ methods. In GD, the SM is simply characterized by means of the following mathematical operation

$$SM_{GD}(x, y) = \sum_{k=1}^{N-1} I_{k+1}(x, y) - I_k(x, y), \quad (1)$$

where $I_k(x, y) \equiv I_k(i, j)$ is the (i, j) component of the resulting digitalized k -th matrix and N is the number of images in the sequence. In turn, the Fujii method introduces a denominator of the form $I_k(x, y) + I_{k+1}(x, y)$ to the sum of equation (1) in order to compensate for fluctuations of the illumination level during image acquisition. Alternatively, our method consists on averaging the differences of equation (1). Mathematically this is expressed as

$$SM(x, y) = \sum_{k=1}^{N-1} |I_{k+1}(x, y) - I_k(x, y)|, \quad (2)$$

and is equivalent to inspecting, on average, how different is each image as compared to the next one in the time sequence. This gives as a result a new image $SM(i, j)$ which serves both as a speckle activity map and as a reconstruction of the specimen image in a similar way of Fujii and GD methods. Despite this, our method allows to get a single SM index and quantify the general degree of mobility of the dynamic speckle pattern. For this, the values corresponding to each pixel of the image emerging from equation (2) are also averaged. This can be expressed as

$$SM = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I(i, j) \quad (3)$$

$$= \frac{1}{m \times n} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)|, \quad (4)$$

where now SM stands for the resulting SM index and m and n are the number of rows and columns of each image, respectively. Hence, the SM index measures the image-to-image area averaged absolute pixel intensity changes.

3. RESULTS

Fig. 4 (a) shows the SM evolution curves for areas of samples 1 and 2, in which fungal growth was suspected to exist after inoculation. The solid (black) curve presents the evolution of SM due to the growth of a fungi colony inoculated into the reference sample of gelatine. All curves in Fig. 4 (a) have a similar behavior as a function of time, having apparently some periodicity in reaching high activity values..

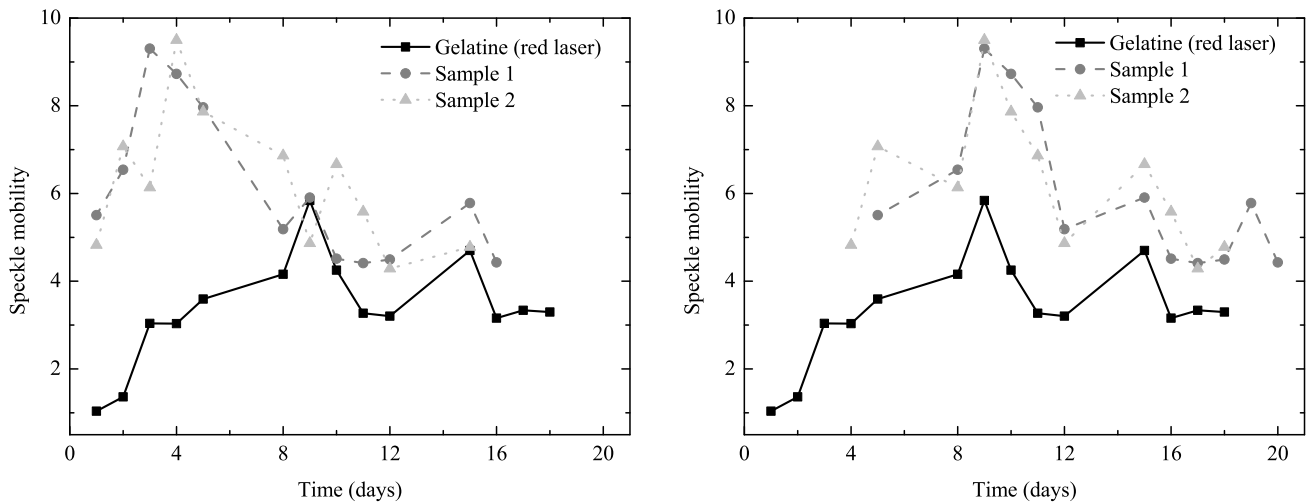


Figure 4. Evolution of speckle mobility for regions of samples 1 and 2 in which fungi were inoculated, (left) original SM curves and (right) curves of samples 1 and 2 were shifted in time to emphasize the fact that high activity peaks seem to appear with a similar period in all curves.'

For all three samples it was possible to see at least two peaks of maximum SM, which seemed to appear with the same temporal period (i. e. were equidistant in time). In Fig. 4 (b) we have introduced a time shifting for the curves corresponding to samples 1 and 2, in order to emphasize the previously observed periodicity. Thus, it is possible to see the coincidence in the period of the high SM peaks.

Fig. 5 shows the SM evolution curve for the fungi colony of sample 4 [shown in Fig. 2 (a)] during a 77 h time period. Several activity peaks were observed, which is similar to the behavior of samples 1 and 2 (Fig. 4).

We attribute the slow decay of the curve to a dehydration process of the fungi colony.

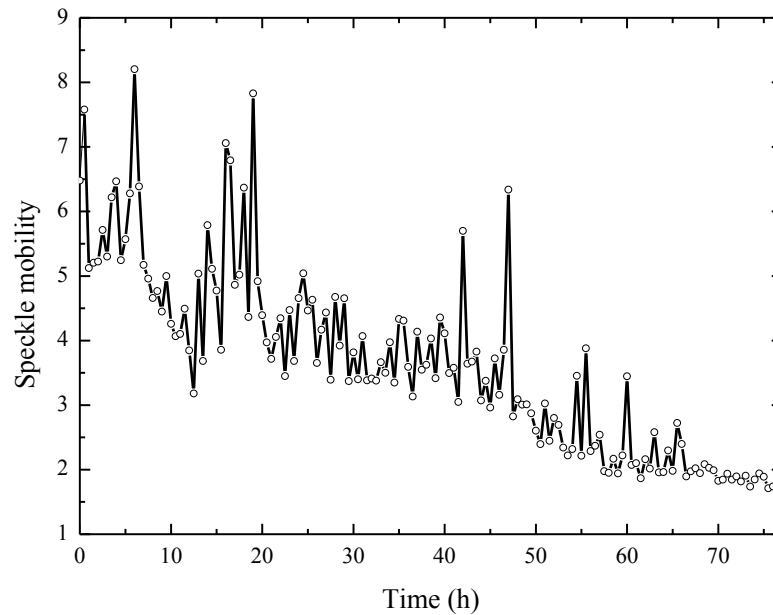


Figure 5. Evolution of speckle mobility of the fungi colony of sample 4 [Fig. 2 (a)] during a 77 h period.

In turn, Fig. 6 shows the evolution of SM values of the fungi colony of sample 5 [similar to Fig. 2 (a)] after application of a sterilization process. An abrupt decay of the SM values is observed, which we attributed to the death process of the mucor colony.

We observed that the development of fungi in the reference sample (gelatine) was slower than the growth of fungi in bone tissue samples. However, the similarities between the curves may indicate the presence of fungi in the bone. By comparing the areas suspected to have been inoculated with other areas in the same sample, there were no notable differences in the SM evolution.

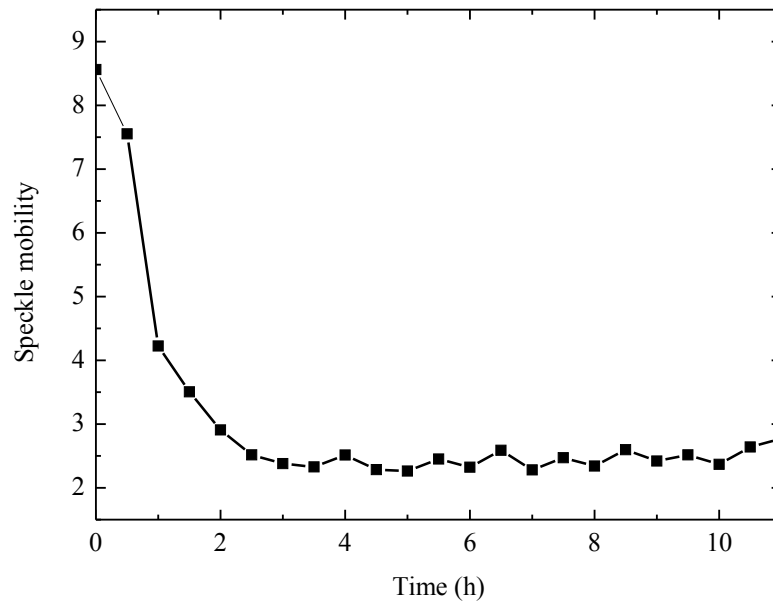


Figure 6. Evolution of speckle mobility of the fungi colony of sample 5 [similar to Fig. 2 (a)] after applying a sterilization method. The abrupt decay of speckle activity is attributed to the death process of fungi.

4. CONCLUSION

In this work we studied the possibility of detecting the growth of mucor fungi colonies on two different environments (bone and gelatin). Through the analysis of the speckle pattern activity of inoculated samples, we could distinguish between the incipient growth of the colony and its death process. Moreover, we could also observe an increment of the speckle mobility even before the fungi colony can be detected by visual inspection through a magnifying glass. As remarkable features, we observed a similar periodicity of high activity peaks of fungi in gelatine and bone and also an abrupt decay of speckle activity of fungi after applying a sterilization method. Therefore, we conclude that dynamic speckle pattern analysis is a useful technique to analyze the growth, existence and death of fungi colonies.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by joint projects from Universidad Tecnológica Nacional of Argentina and Universidade Da Coruña of Spain.

REFERENCES

- [1] Rabal, H. J. and Braga, R. A., [*Dynamic Laser Speckle and Applications*], CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton Fl. 181-220 (2009).
- [2] Lammertyn, J., Peirs, A., Baerdemaeker, J. D., and Nicolai, B., "Light penetration properties of nir radiation in fruits with respect to non-destructive quality assessment," *Postharvest Biology and Technology* **18**, 121–132 (2000).
- [3] Braga, R. A., Rabelo, G. F., Granato, L. R., Santos, E. F., Machado, J. C., Arizaga, R., Rabal, H. J., and Trivi, M., "Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique," *Biosystems Engineering* **91**, 465–469 (2005).
- [4] Karimi, K. and Zamani, A., "Mucor indicus: Biology and industrial application perspectives: A review," *Biotechnology Advances* **31**(4), 466 – 481 (2013).
- [5] Fujii, H., Nohira, K., Yamamoto, Y., Ikawa, H., and Ohura, T., "Evaluation of blood flow by laser speckle image sensing. part i," *Applied Optics* **26**, 5321–5325 (1987).
- [6] Arizaga, R., Cap, N., Rabal, H. J., and Trivi, M., "Display of local activity using dynamic speckle patterns," *Opt. Eng.* **41**, 287–294 (2002).
- [7] Aizu, Y. and Asakura, T., "Biospeckle phenomena and their application to the evaluation of blood flow," *Opt. Laser Technol.* **23**, 205–219 (1991).
- [8] Budini, N., Mulone, C., Vincitorio, F. M., Freyre, C., López, A. J., and Ramil, A., "Two simple methods for overall determination of activity in dynamic speckle patterns," *Optik* (2013). In Press.

Analysis of strawberry ripening by dynamic speckle measurements

C. Mulone^{a,*}, N. Budini^{a,b}, F. M. Vincitorio^a, C. Freyre^a, A. J. López Díaz^c, A. Ramil Rego^c

^aUniversidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná. Avda Almafuerce 1033, E3100XAI, Paraná, Argentina;

^bInstituto de Física del Litoral (CONICET-UNL), Güemes 3450, S3000GLN, Santa Fe, Argentina;

^cUniversidade Da Coruña, Escuela Politécnica Superior, Av. Esteiro S/N, Ferrol, Spain.

ABSTRACT

This work seeks to determine the age of a fruit from observation of its dynamic speckle pattern. A mobile speckle pattern originates on the fruit's surface due to the interference of the wavefronts reflected from moving scatterers. For this work we analyzed two series of photographs of a strawberry speckle pattern, at different stages of ripening, acquired with a CMOS camera. The first day, we took ten photographs at an interval of one second. The same procedure was repeated the next day. From each series of images we extracted several statistical descriptors of pixel-to-pixel gray level variation during the observation time. By comparing these values from the first to the second day we noticed a diminution of the speckle activity. This decay demonstrated that after only one day the ripening process of the strawberry can be detected by dynamic speckle pattern analysis. For this study we employed a simple new algorithm to process the data obtained from the photographs. This algorithm allows defining a global mobility index that indicates the evolution of the fruit's ripening.

Keywords: Dynamic speckle, biospeckle, mobility index, fruit maturation

1. INTRODUCTION

When an optically rough surface is illuminated with light having a high degree of coherence, such as one coming from a laser, the scattered light presents a particular intensity distribution making the surface appear to be covered with a fine granular structure. This structure, which consists of alternately dark and bright spots of variable shapes distributed in a random way, has no obvious relation to the macroscopic properties of the surface.¹ The observation of dynamic speckle patterns variations on living cells, such as fruit cells, is a particular case of study known as biospeckle.

Speckle patterns serve to study some characteristics of diverse materials (organic and inorganic), which is generally carried out by two different methods: dynamic speckle analysis (or bispeckle) and digital speckle interferometry. In the latter method, two different states of a sample are compared having introduced an external perturbation between both states. On the contrary, the former method studies the evolution of a particular aspect of the sample under study. When it comes to biological samples, cell structures present changes on their size (or in their refraction indexes) that become evident due to an important temporal variation on the speckle pattern.¹

When a laser with a wavelength above 600 nm is used, the speckle pattern does not only depend on the surface, but also on the inner tissues. This is due to the penetration depth of light near the bottom edge of the infrared in biological tissue. As an example, in the case of apple peel the penetration depth of light with a wavelength above 600 nm is higher than 2 mm.² Pattern analysis must be done through a digital processing of the images taken with a CMOS camera. There are several methods to analyze temporal evolution of dynamic speckle patterns.³⁻⁶ In this work we present results obtained from the analysis of dynamic speckle patterns of strawberries through the application of a simple new algorithm based on the statistical parameters extracted from the acquired sequence of images.

*Corresponding author e-mail: ceciliamulone@gmail.com

2. METHODOLOGY

2.1 Optical methodology

For illumination, a 50 mW HeNe laser was used as a coherent light source. The wavefront was expanded and filtered by a 15 μm spatial filter. The fruit was illuminated directly by the filter without diffusers, as can be observed in the simplified scheme of Fig. 1. A 1 megapixel CMOS camera was used to record sequences of images.

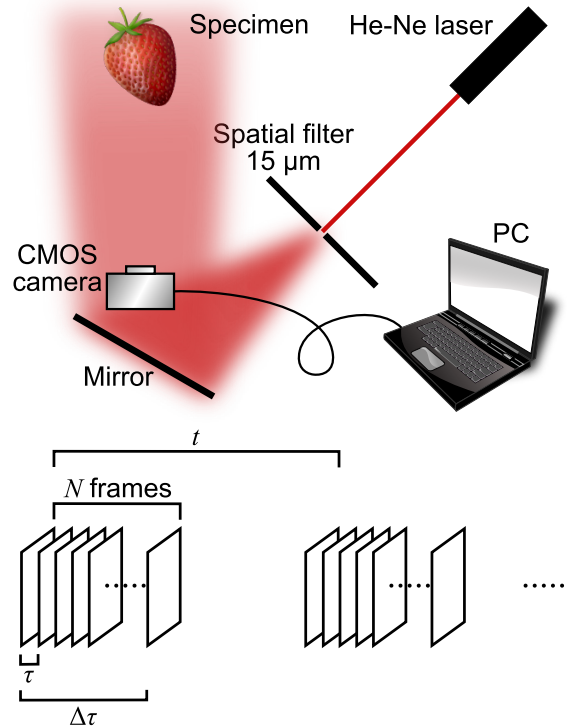


Figure 1. Simplified scheme of the optical set up and the temporal parameters involved during image acquisition

2.2 Algorithm development

For the analysis of the dynamic speckle patterns, we developed a simple processing algorithm using the MATLAB® interface. It consists of a digital image capture routine and a data processing block of instructions, based on statistical analyses performed on the evolution of the dynamic speckle images. As a prerequisite, it is necessary to take N photographs in a sequence having a well-defined time interval between them, τ . From this statistical analysis, a mobility index (MI) is defined to represent the overall activity of the dynamic speckle pattern image sequence, as

$$\text{MI} = \frac{1}{m \times n} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} \sum_i^m \sum_j^n |I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)|. \quad (1)$$

Stability of light intensity values is very important for a proper performance of the algorithm, since there is a direct correlation between the calculated MI and the reflected light intensity.

Before processing, photographs were converted into grayscale images and then transformed into numeric matrices, correlating each one of their elements to a pixel. The gray value of each pixel ranges from 0 to 255, where 0 represents colour black and 255 white. With the information obtained from the difference of eq. (1) and using a simple subroutine it is possible to achieve a reconstruction of the fruit's image, which indicates the ripening state of each region of the fruit's surface.

2.3 Samples under study

In this work we have studied four different strawberry samples (A, B, C and D from now on). Sample A was analyzed during $t = 24$ h acquiring two sequences of $N = 10$ photographs with $\tau = 1$ s between them (see Fig. 1). For the rest of the samples, the observation period was fixed at $t = 30$ min taking also $N = 10$ photographs and $\tau = 1$ s. In this way, sample B was inspected during 87 h, sample C during 82 h and sample D during 74 h. Sample D was frozen at -12 °C for 24 h previous to the experiment, in order to hasten the ripening process.

3. RESULTS

In the following sections we detail the results obtained from each sample.

3.1 Sample A

This sample was used as a test for the algorithm and allowed us to prove that the MI diminished appreciably from one day to the next. For this we calculated some statistical descriptors, such as average, mean, mode, etc., which are presented in Table 1. The MI value dropped from 1.44 to 0.89.

Table 1. Statistical descriptors of sequences taken on first and second day for sample A.

Descriptor	Day 1	Day 2
Mean	1.160	0.950
Standard error	0.004	0.000
Median	0	0
Mode	0	0
Standard deviation	1.962	1.685
Variance	3.849	2.841
Range	28	27
Min.	0	0
Max.	28	27
MI	1.440	0.887

Fig. 2 presents the image reconstruction of sample A which clearly shows that as cellular activity decayed, between the first and second day, the image definition deteriorated. This is in agreement with the diminishing of MI.

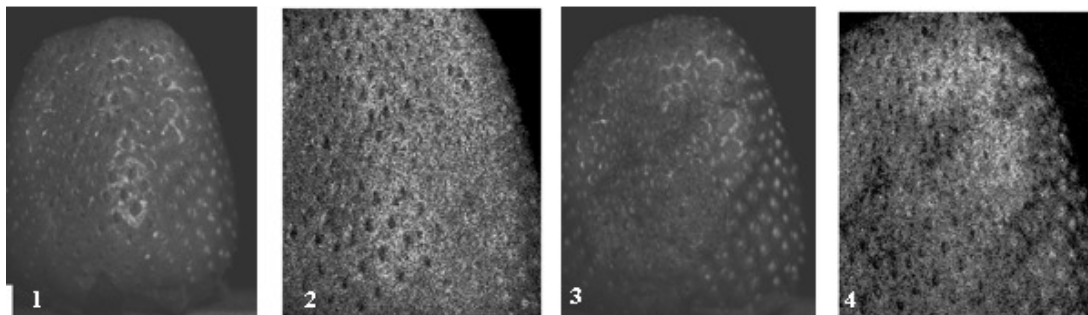


Figure 2. Sequence of photographs of a strawberry reconstructed by the algorithm, (1) image of the first day, (2) first day reconstruction, (3) image of the second day, (4) second day reconstruction.

3.2 Sample B

The MI recorded for this sample ranged between 10.0 and 7.2. In Fig. 3 it is possible to observe a decreasing mobility as a function of time, which shows a slight fluctuation above and below the average trend curve.

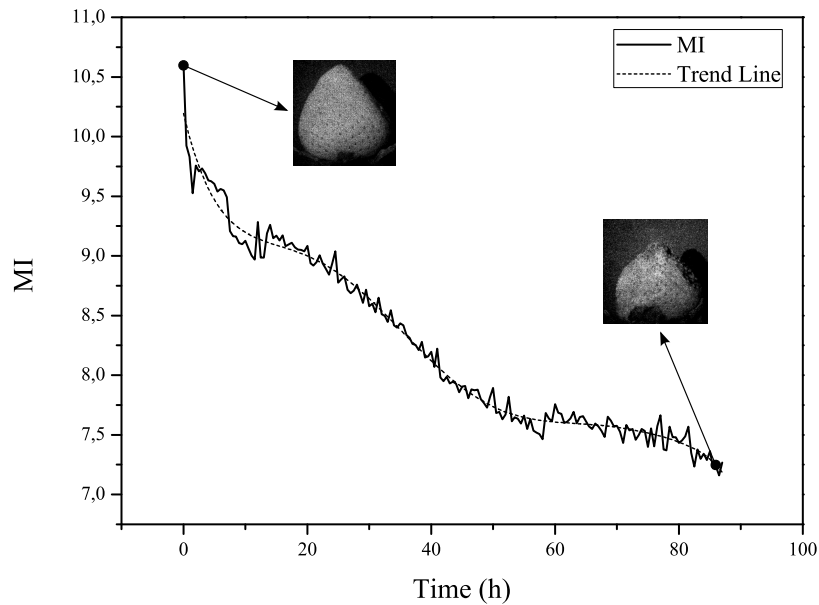


Figure 3. MI evolution of sample A over time and reconstructions of initial and final state images.

3.3 Sample C

For this strawberry, the MI recorded ranged between 5.0 and 1.6. The evolution of the mobility through the observation period is shown in Fig. 5. A black area can be seen in the bottom right region of the reconstructed

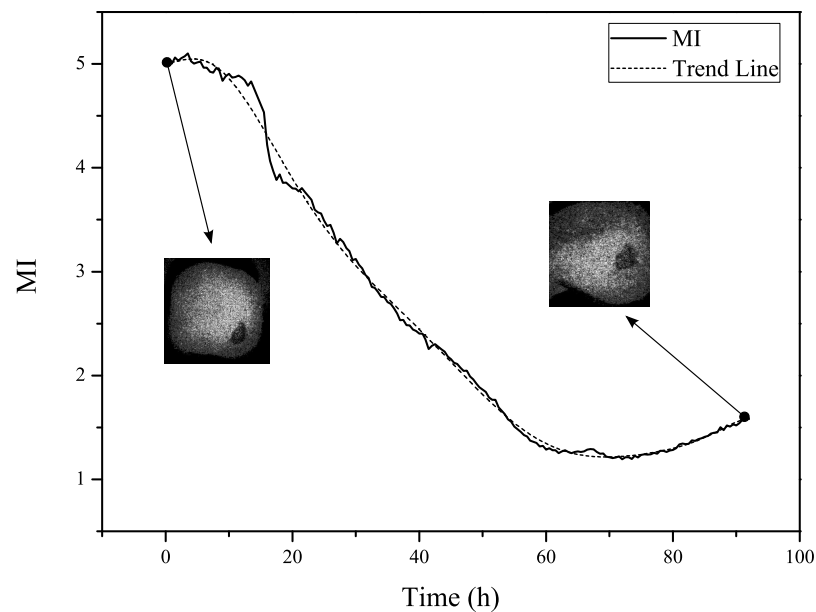


Figure 4. MI evolution of sample C over time and reconstructions of initial and final state images.

image for the initial state of this strawberry. The black spot corresponds to a bruised area, where the registered local MI registered was nearly zero throughout the experiment, which is in accordance with the fact that the MI is lower than in sample B. We observed a constant MI diminution for approximately 60 h, followed by a slight increment for longer times which is due to fungi activity as is detailed in Section 4.

3.4 Sample D

For this sample we obtained MI values ranging between 9.0 and 0.7. All data obtained is shown on Fig. 5. MI presented an important decrease in the first 5 h period, followed by a decay without important random fluctuations above and below the average curve.

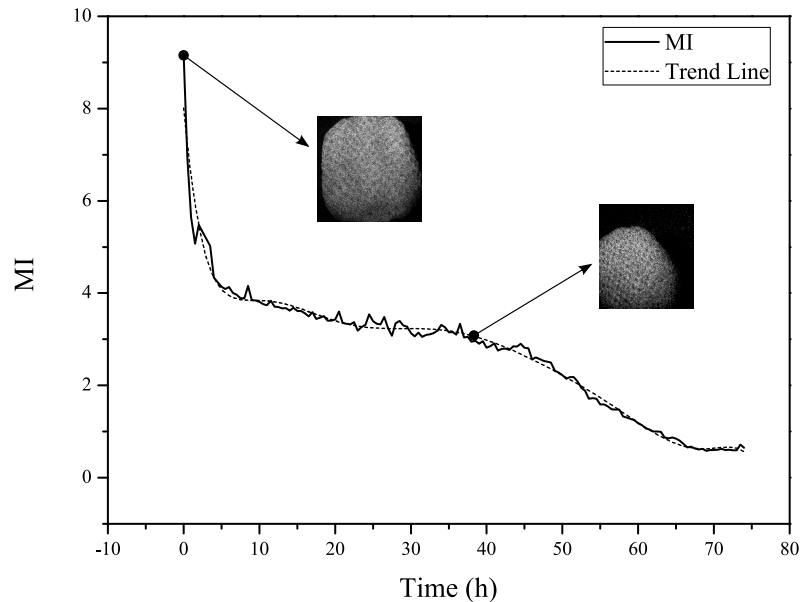


Figure 5. RMI evolution of sample C over time and reconstructions of initial and final state images.

4. DISCUSSION

Results obtained from all samples showed a typical response of ripening biological tissues, i. e. a MI diminution as the fruit matures. The distribution of values above and below the average curve is related to biospeckle pattern's random behavior. Sample C presented an increase in the mobility index for no apparent reason, approximately

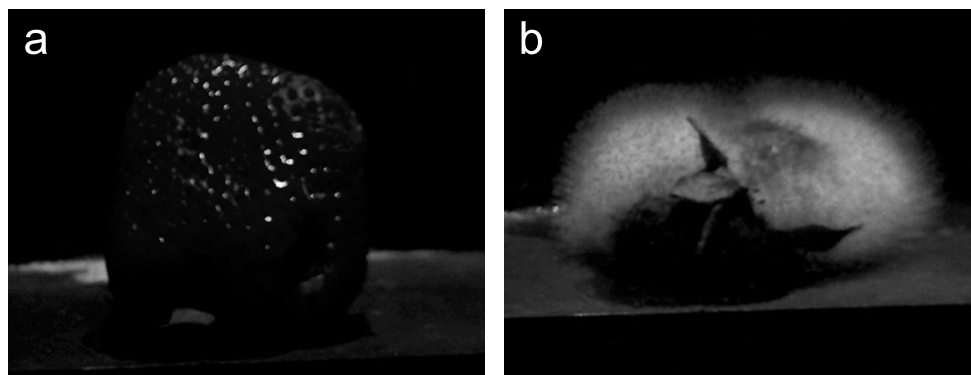


Figure 6. (1) Sample C at the beginning of the experiment (2) Sample B at the end of the experiment.

60 h after the start of the experiment. Under the same conditions, hours later, we noticed the formation of fungi colonies (see Fig. 6). These results allowed us to infer that the increase in the mobility of the dynamic speckle pattern was due to the activity of fungi growth.⁷

For sample D, cell mobility diminished faster than in the other samples. This was due to the damage inflicted to the cells when the fruit was frozen. Moreover, we attribute such high initial MI values to the fact that the sample was defrosting and that might have caused higher activity due to humidity condensation and subsequent evaporation on the fruit's surface.

5. CONCLUSION

This paper proposes a simple processing algorithm to analyse images obtained from biospeckle patterns, different from those documented in the available literature. This algorithm allows to achieve an image reconstruction, besides an index that represents cellular mobility in the sample under study. The application of this method shows that it's possible to define the fruit's conservation state from the study of its dynamic speckle patterns. All this procedure was verified by contrast with the methods specified in existing literature sources.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by joint projects from Universidad Tecnológica Nacional of Argentina and Universidade Da Coruña of Spain.

REFERENCES

- [1] Rabal, H. J. and Braga, R. A., [*Dynamic Laser Speckle and Applications*], CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton Fl. 181-220 (2009).
- [2] Lammertyn, J., Peirs, A., Baerdemaeker, J. D., and Nicolai, B., "Light penetration properties of nir radiation in fruits with respect to non-destructive quality assessment," *Postharvest Biology and Technology* **18**, 121–132 (2000).
- [3] Braga, R., Silva, B. O., Rabelo, G., Costa, R. M., Enes, A. M., Cap, N., Rabal, H., Arizaga, R., Trivi, M., and Horgan, G. W., "Reliability of biospeckle image analysis," *Optics and Laser in Engineering* **45**, 390–395 (2007).
- [4] Fujii, H., Nohira, K., Yamamoto, Y., Ikawa, H., and Ohura, T., "Evaluation of blood flow by laser speckle image sensing. part i," *Applied Optics* **26**, 5321–5325 (1987).
- [5] Arizaga, R., Cap, N., Rabal, H. J., and Trivi, M., "Display of local activity using dynamic speckle patterns," *Opt. Eng.* **41**, 287–294 (2002).
- [6] Aizu, Y. and Asakura, T., "Biospeckle phenomena and their application to the evaluation of blood flow," *Opt. Laser Technol.* **23**, 205–219 (1991).
- [7] Braga, R. A., Rabelo, G. F., Granato, L. R., Santos, E. F., Machado, J. C., Arizaga, R., Rabal, H. J., and Trivi, M., "Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique," *Biosystems Engineering* **91**, 465–469 (2005).

Holographic interferometry as a method to detect welding failures on ribbed iron structures

F. M. Vincitorio^{a,*}, N. Budini^{a,b}, C. Mulone^a, C. Freyre^a, M. Spector^a, A. J. López Díaz^c, A. Ramil Rego^c, A. Yañez Casal^c

^aUniversidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná. Avda Almafuerce 1033, E3100XAI, Paraná, Argentina;

^bInstituto de Física del Litoral (CONICET-UNL), Güemes 3450, S3000GLN, Santa Fe, Argentina;

^cUniversidade Da Coruña, Escuela Politécnica Superior, Av. Esteiro S/N, Ferrol, Spain.

ABSTRACT

Metallic structures made of ribbed iron bars (ADN-420) are of common use in sheds and supporting structures. Usually, trusses are constructed with many pieces of ribbed iron bars, combined together through a welding process. Although ribbed iron manufacturers do not recommend this type of structure it is still frequently used. The main weakness of these trusses is the welding point because ribbed iron is not a material suitable for welding. This work presents results obtained from an analysis of welding points between ribbed iron bars extracted from a collapsed truss, by means of conventional (optical) and digital holographic interferometry (HI and DHI, respectively). The experiments were divided in two different series of studies. The first series were performed by HI on metallographic samples while the second series were done by DHI on different welding points. These results were complemented by metallographic analysis made in an external laboratory. DHI indicated that the bars did not have important failures but evidenced defects in one of the welding points under analysis. This information together with metallographic results allowed inferring that the collapse was probably due to an error in the design of the structure, since the iron bars were out of standard compliance.

Keywords: holographic interferometry, digital holographic interferometry, ribbed iron trusses, cracks, residual stress

1. INTRODUCTION

Holographic interferometry (HI) is a non-destructive testing at constant evolution. During the last decade, digital holographic interferometry (DHI) replaced old photographic methods.¹ The main difference between HI and DHI is the use of a CCD or CMOS camera instead of a silver halide plate for recording the holographic image. A conventional interferogram is generated by superposition of two wavefronts with the same reference wave. The first wavefront belongs to the object in its normal state (reference state) and the second wavefront belongs to the object under some external perturbation (loaded state). The interferogram carries information about the phase change between both states in the form of dark and bright interference fringes superimposed on an amplitude image.² In DHI, phase and amplitude information are processed independently. This property allows achieving digital reconstructions of phase changes. Phase maps on the plane of the CMOS camera, coordinates (ξ, η) , at the normal (1) and loaded (2) state can be calculated as:

$$\begin{aligned}\phi_1(\xi, \eta) &= \arctan \frac{\Im [I_1(\xi, \eta)]}{\Re [I_1(\xi, \eta)]} \\ \phi_2(\xi, \eta) &= \arctan \frac{\Im [I_2(\xi, \eta)]}{\Re [I_2(\xi, \eta)]},\end{aligned}\tag{1}$$

where I_1 and I_2 are the recorded holographic images at each state and $\Re[\cdot]$ and $\Im[\cdot]$ represent their real and imaginary parts, respectively. The inverse tangent function which, in this case, gives the phase of a complex

*Corresponding author e-mail: fisicaelectronica@frp.utn.edu.ar. Phone/fax +54-343-4243054

number, yields angles laying in a bounded domain ranging from $-\pi$ to π . Therefore, each fringe in the interferogram determines a phase jump which is undetermined up to a quantity 2π . The phase difference between the two phase maps of eq.(1), i. e. the phase difference resulting from the interference of both wavefronts, can be directly calculated (modulo 2π) by subtracting the respective phases

$$\Delta\phi = \begin{cases} \phi_1 - \phi_2 & \text{when } \phi_1 > \phi_2 \\ \phi_1 - \phi_2 + 2\pi & \text{when } \phi_1 < \phi_2. \end{cases} \quad (2)$$

Hologram reconstruction and its subsequent analysis, as is done in conventional holography, is totally unnecessary with DHI, since the numerical processing algorithm provides all the information concerning phase changes over the area under study (thru an inverse Fourier transform).^{3,4} However, the application of a phase unwrapping algorithm, is needed in order to obtain a continuous phase map. This is a powerful tool for analyzing displacements or deformations with magnitudes in the order of the wavelength used for illumination.

1.1 Case of study

Metallic structures made of ribbed iron bars (type ADN-420) are of common use for sheds and supporting structures. Trusses are usually constructed starting from many pieces of ribbed iron bars, of different sizes, joined together by means of a welding process. However, iron manufacturers do not recommend this type of iron for these structures it is indeed frequently used. Due to the fact the these iron bars are not suitable for welding, the main weaknesses of trusses constructed with them might be, obviously, the welding points. In this work, samples of welding points between ribbed iron bars, obtained from a collapsed structure were studied. The possible causes of truss breakdown are not well defined, but one of the more strong hypotheses pointed to a stress problem in the welding points. A second possible hypothesis was that the material (ADN-420) did not meet standard regulations. In this context, HI and DHI analyses were performed on the welded iron samples aiming to find welding defects which would reinforce the first hypothesis. Also, the study served to compare both interferometric techniques. The holographic analysis was divided into two series. For the first series, a conventional HI study was performed on metallographic samples embedded on bakelite. This is a very interesting case of study due to the differences between the contrast of iron and of bakelite, being the former very reflective while the other is near to total absorption. The second series was analyzed through DHI. All of the samples, from both series one were taken from the most critical area of the collapsed trusses.

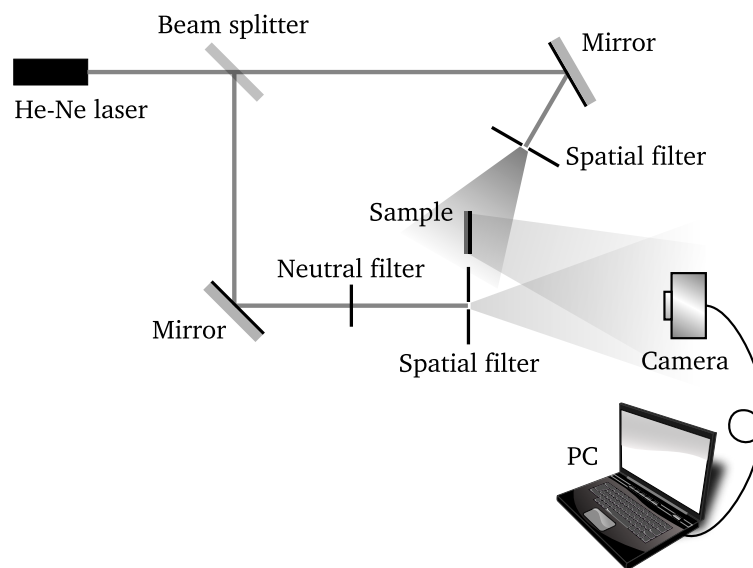


Figure 1. Simple diagram of a double way holographic recording technique.

2. METHODOLOGY

The technical protocol to analyze iron structures includes metallographic studies, resistance to compression and traction, a bending test according to IRAM standards (IAS U 500-102)⁵ and this work contributes and complement those tests with a HI analysis of welding points and iron bars. Due to the fact that the holographic analysis requires to induce some kind of perturbation to the samples, they were subjected to volumetric expansion by means of thermal excitation and left to cool freely at room temperature. In this way, the interferometric analysis was performed during thermal contraction of the samples after being heated to some temperature around 50 °C. HI and DHI, as were performed in this work, are reversible in time. This means that if the lowest temperature hologram is taken as reference, the interferogram obtained with higher temperature holograms would describe a thermal expansion sequence. In contrary, if the highest temperature hologram is taken as reference the sequence of interferograms would represent a thermal contraction.

For the first series, to which the conventional HI technique was applied, a previous metallographic analysis has demonstrated the absence of non-metallic deposits, corrosion and strange alloys.

The double way holographic technique is based on the utilization of a double optical path. Using a beam splitter, the light emitted by the laser is divided into two beams (reference and object beam) with a 1:1 intensity ratio between them. Double exposure conventional HI involves the use of two different holograms that are recorded on the same photographic film. The first hologram is taken when the object presents a volume V_1 , and the second one when the object has a volume V_2 (with $V_2 > V_1$, in this case). The reference beam is kept the same for both exposures. If the difference between the optical paths of both exposures is several laser wavelengths, the resulting hologram consists of an interference fringe pattern superimposed on the object's image. This method allows studying both static and dynamic movements of a rough surface with a high level of precision.

For the second series, four different samples (1 to 4, from now on) under thermal contraction were studied using the DHI method. Samples 1 and 2 were bars between two welding points of a collapsed truss, cut and polished to eliminate burrs. Samples 3 and 4 were V-shaped welding points that were studied from two different views to find cracks or stress zones (see Fig. 2).

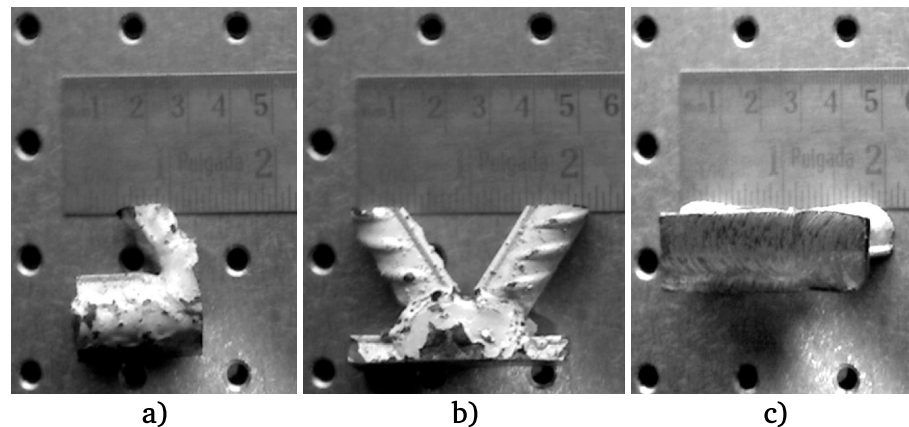


Figure 2. (a) Transverse cut of sample 3, (b) front view sample 4 and (c) bottom view of sample 4.

To study the second series, a Gabor's double optical path scheme and double exposure technique was used. In this set-up the object was illuminated with a spherical wavefront, through a 15 μm spatial filter and located in front of the CMOS camera. A reference spherical wave front, emanating from a 5 μm spatial filter, also illuminates the camera. The angle between the camera's optical axis and the reference beam is smaller than 8.3° (see Fig. 3). The difference between this set-up and Gabor's "in-line" optical mounting is the use of a beam splitter just in front of the recording device (film or camera).

2.1 Film processing

The holograms of the first series were recorded on PFG-03 Slavich holographic films, that were exposed to a 30 mW He-Ne laser for an 8 to 10 s time period in order to achieve adequate optical density levels. The sample

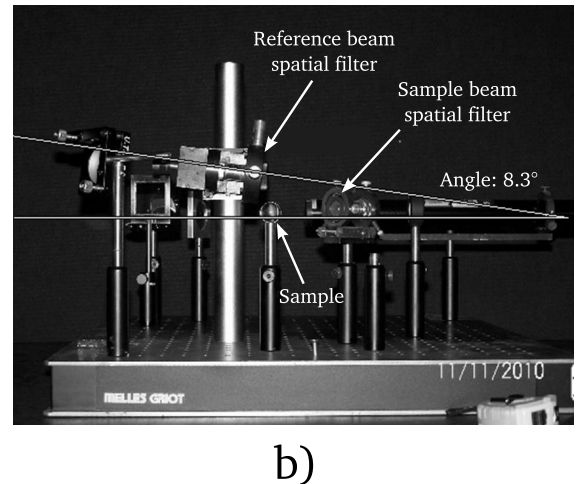
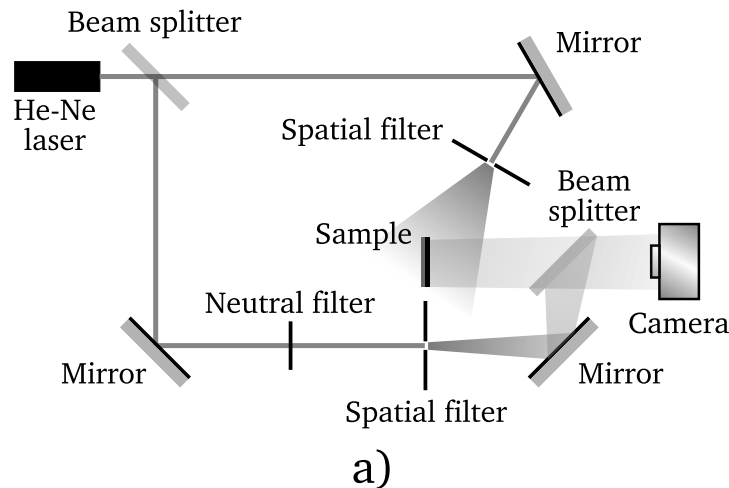


Figure 3. (a) Gabor's "in-line" set-up and (b) modified "in-line" Gabor hologram arrangement without mirror and beam splitter.

was kept at different temperatures for each partial exposure (with $\Delta T = 3^\circ\text{C}$). To obtain the holographic interferogram, a Photographer Formulary Inc.'s JD-2 holography processing kit was employed. The process consists of four steps:

1. Developing: submerging the film during 4 to 6 min in a solution at 32°C .
2. Fixing: a 10 min distilled water bath.
3. Bleaching.
4. Washing: 5 min under a water flow.

After this chemical procedure, the film is placed on a film holder and illuminated with the reference beam. The virtual image of the object appears on its initial position and the interferogram is superimposed on this image, appearing as a fringe pattern. Afterwards, a digital photograph is taken for processing on the PC.

2.2 Digital processing algorithm

For DHI of the second series, the image reconstruction was achieved by a processing algorithm that was developed using the MATLAB® interface. The algorithm flowchart is schematized in Fig. 4. In this case, in a similar way as in HI, it was necessary to take (at least) two digital images of the same object at different conditions. Here again, a volumetric contraction induced by free cooling at room temperature was analyzed. In DHI, the principal advantages are the possibility of acquiring a sequence of images in a wide temperature range and the ease of digital processing as compared to developing photographic films in HI. For the analysis, the samples were heated to a temperature near 50°C and left to cool freely at room temperature. The first hologram was set as reference and the rest of them were compared to it. This allows to compare multiple temperature values in only one experiment. As will be seen in the results, interference fringes reached their maximum definition at $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ and $\Delta T = 3^\circ\text{C}$.

3. RESULTS

3.1 First Series

For the first series, only one hologram was taken to find irregularities on the metallographic sample, that was previously analyzed by other methods to find intercrystalline corrosion or non-metallic inlays. These tests gave a negative result, which means that the sample was in good metallographic conditions. HI test was performed

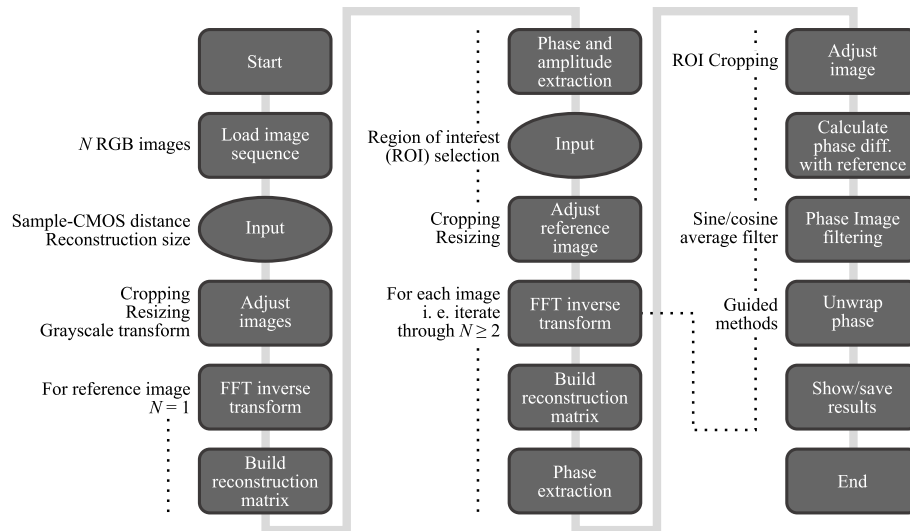


Figure 4. Image reconstruction algorithm for DHI method.

as previously mentioned. The fringe pattern revealed an uniform behavior during thermal expansion, without any apparent localized residual stress (see Fig. 5). Fringes presented an uniform distribution and a smooth curvature.

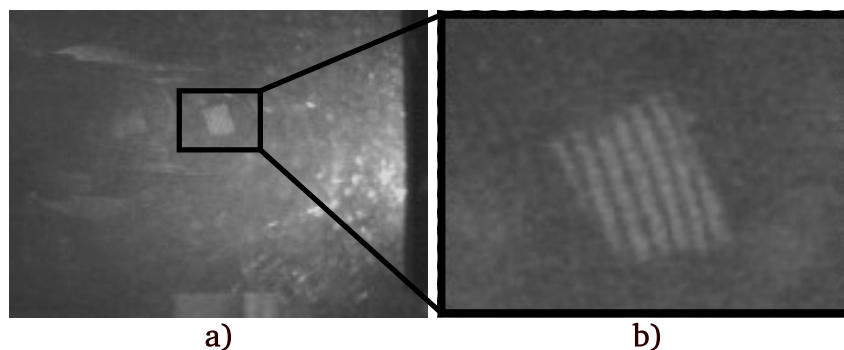


Figure 5. (a) Photograph of metallographic sample and (b) image enlargement on the region of interest.

3.2 Second Series

A large number of holograms were obtained from the 4 samples, and the results obtained are described in the following sections.

3.2.1 Samples 1 and 2

Samples 1 and 2 were extracted from between two welding points of a collapsed truss. Both of them showed an equal behaviour under similar experimental conditions. More than sixty different interferograms obtained by DHI technique were analyzed during cooling. The thermal contraction process gave as a result straight interference fringes with a spatially homogeneous distribution over the surface under study, without any apparent irregularities (see Fig. 6). The inclination angles of the fringes indicated that the thermal contraction was not normal to the observation direction, due to the difference between observation and illumination angles. All DHI images of these samples showed homogeneous fringe patterns (like those presented on Fig. 6) that may indicate the absence of both residual stress and non-metallic inlays in the material. Any of these defects could cause disturbances during thermal expansion or contraction with subsequent inhomogeneities in the fringe distribution.

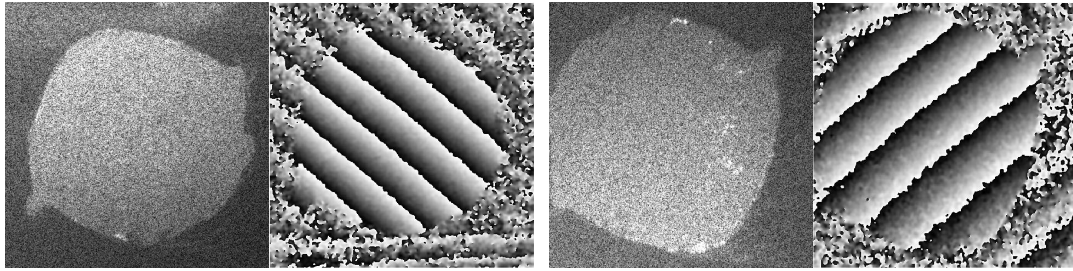


Figure 6. Reconstructed amplitude image and interferogram of sample 1 ($\Delta T = 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (left) and sample 2 ($\Delta T = 1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) (right).

3.2.2 Sample 3

Sample 3 is a V-shaped welding point that was transversally cut at the middle in order to inspect the metallic union in detail. As a remarkable feature, this welded union presented a hole which can be seen with different amplifications in Fig. 7 (a)-(c). This cavity is a consequence of a defective welding and inside it, beneath the surface, it is possible to see a little bubble (not so clear in Fig. 7).

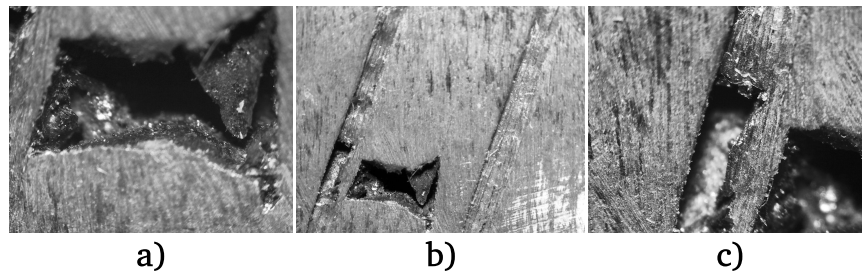


Figure 7. Details observed on a longitudinal cut of the welding zone (sample 3).

More than fifty holograms were acquired, divided in three different sequences. The working temperature range to induce thermal expansion, and subsequent contraction, was defined between $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Each hologram was acquired after a temperature variation of $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ respect to the previous one. Fig. 8(a)

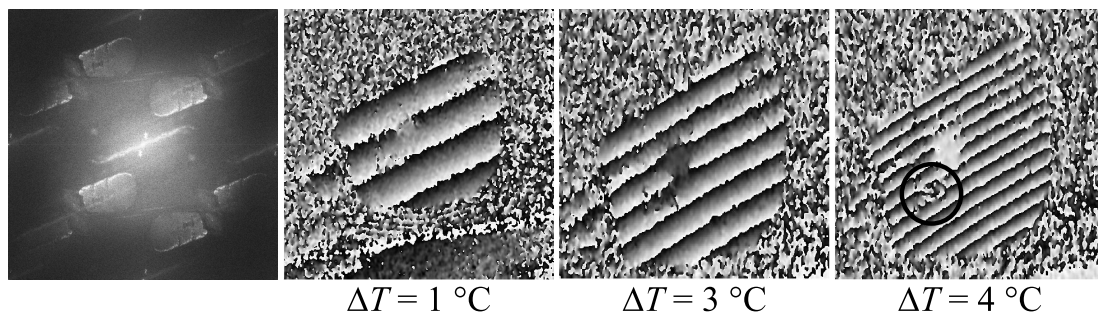


Figure 8. (a) Reconstructed amplitude image of sample 3, (b), (c) and (d) inergerograms of the same sample after cooling at different temperature intervals.

shows a raw reconstructed amplitude image of sample 3 (left) and three different interferograms of the region of interest. The temperature interval is shown below them. The first interferogram from the left ($\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) presents an homogenous fringe distribution without evidence of residual stress. The second fringe (starting form the top) was interrupted by the hole on the surface, but this did not seem to correspond to an inhomogeneity during contraction.

In DHI images for $\Delta T = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\Delta T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, fringes are more compact due to a larger temperature interval. The hole became evident on both holograms and a fringe disorder can be observed in the surrounding area. For $\Delta T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ the black circle indicates an area with an apparent residual stress, which might be due to the bubble beneath the surface that was observed through the microscope (Fig. 7).

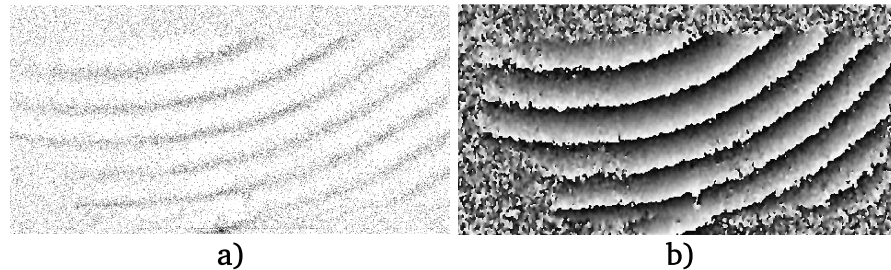


Figure 9. (a) Reconstructed phase map of sample 2 and (b) interferogram of the same sample.

3.2.3 Sample 4

Sample 4 is shown in Figs. 2 (b) and (c). Fifteen holograms were taken by DHI in a temperature interval $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. The object surface was placed carefully such the contraction was as most perpendicular to the camera's optical axis as possible, which is usually called the observation angle of pure z deformation (see Fig. 9). In this way, all DHI images presented homogenous concentric fringes without traces of residual stress. The apparent inhomogeneity centered at the bottom is due to the superposition of the holographic image and its twin image, which is commonly present in DHI reconstructed images.

4. DISCUSSION

Two optical interferometric methods, five samples and more than two hundred DHI images were analyzed to find residual stress, non-metallic inclusions or welding imperfections. Moreover, a metallographic sample was studied by HI and metallographic analyses. The results of the three methods agreed regarding the behavior and characteristics of the material. However, metallographic analysis yielded a non-fulfillment of IRAM standards in relation to the bending properties of ribbed iron bars (ADN-420).

The interferograms shown in Fig. 8 indicate defects on the welding point. This anomaly, a hole with a bubble inside, could be detected using just a microscope. However, at $\Delta T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, the interferogram showed possible residual stress around the hole present in the welding's amalgamation point, that could only be observed through HI and DHI. Unwrapped phase diagrams provided more information about this finding, as shown in Fig. 10 (a), presenting a clear discontinuity in the unwrapped phase map that could not be resolved by the guided methods of the unwrapping algorithms. This discontinuity indicated local anomalies in the material, most probably due to the presence of the hole and those imperfections underneath the surface which were shown in Fig. 7. Also, the phase discontinuities on the defect's surroundings suggested the existence of residual stress in the welding point. Fig. 10 (b) shows, for the sake of comparison, the unwrapped phase map of sample 1, which did not present any discontinuity, as opposed to sample 3 of Fig. 10 (a). The noise observed at the edges of these two figures is due to random phase variations in the empty zone around the object.

5. CONCLUSION

Different tests were performed on several samples obtained from a collapsed structure, built with ribbed iron bars. They were firstly analyzed in an external metallographic laboratory and, subsequently, by HI and DHI. In this work, the results obtained by the holographic methods were presented, for which more than two hundred interferograms were acquired and inspected. For this purpose, all samples were subjected to a thermal excitation, and holograms were acquired during their free cooling (i.e. during thermal contraction) at room temperature. Only one sample (referenced as sample 3) presented apparent evidence of a defective welding point. By simple

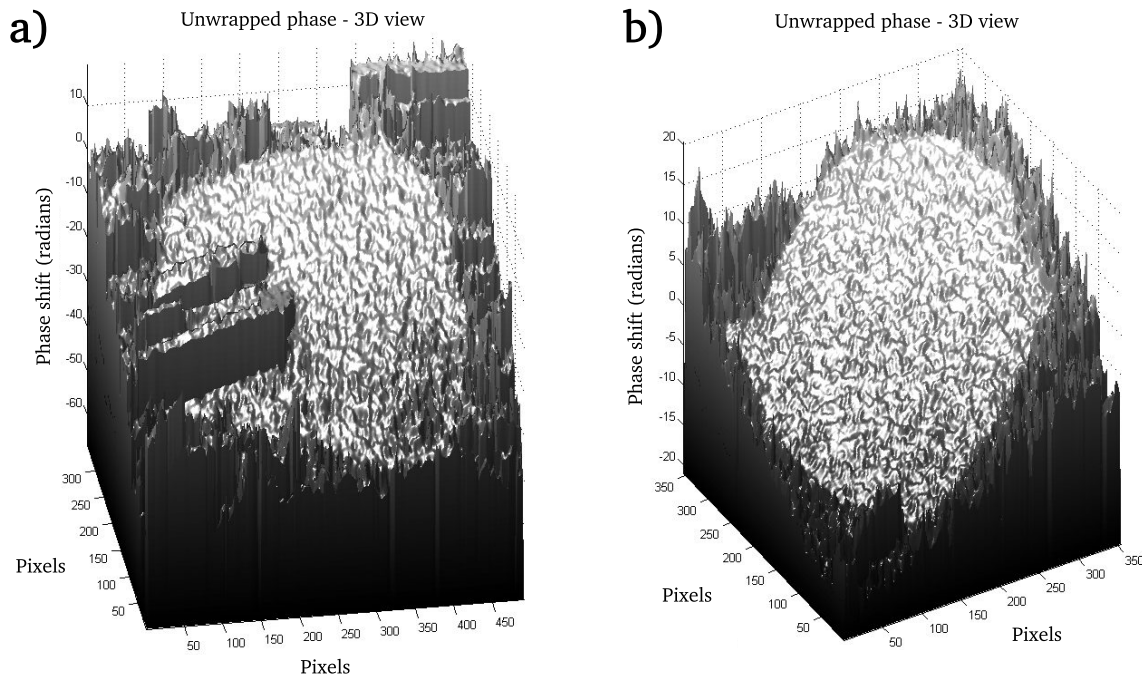


Figure 10. Comparison between three dimensional plots of the unwrapped interferometric phase maps for two different samples, (a) sample 3 with $\Delta T = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and (b) sample 1 with $\Delta T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$. It should be noted a discontinuity on the welding point of sample 3, which might be due to the existence of residual stress.

visual inspection at naked eye it was possible to observe a hole inside this welding point, besides several defects inside it. Also, after the holographic study, discontinuities in the interferometric phase map might indicate the existence of residual stress in its surroundings. This defective zone, if also present in other welding points of the structure, might have caused weakness on the structure when subjected to continuous thermal expansion or contraction, which is unavoidable during the alternation between day and night hours. Furthermore, a non-fulfilment of material standards was reported by the metallographic laboratory. In engineering science, the non-compliance with standards is considered as the principal cause of failures. Both HI and DHI, combined with thermal excitation of the sample, are useful qualitative techniques to study and characterize several materials and junctions or welding points, as was realized in the present work.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by joint projects from Universidad Tecnológica Nacional of Argentina and Universidade Da Coruña of Spain.

REFERENCES

- [1] Caufield, H. J., [*Handbook of Optical Holography*], Academic Press, San Diego, California (1979).
- [2] Schnars, U. and Jueptner, E., [*Digital Holography*], Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2005).
- [3] Valin, J., Goncalves, E., Palacios, F., and Perez, R., "Methodology for analysis of displacement using digital holography," *Optics and Lasers in Engineering* **43**, 99–111 (2005).
- [4] Hipp, M., Woisetschlager, J., Reiterer, P., and Neger, T., "Digital evaluation of interferograms," *Measurement* **36**, 53–66 (2004).
- [5] "Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM)." <http://www.iram.org.ar/> (2013).

Analysis of Small Deflections by Double-Exposure Digital Holographic Interferometry

Nicolás Budini^{*†1}, Cecilia Mulone^{*}, Fabio M. Vincitorio^{*}, Ana J. López^{‡2}, Alberto Ramil[‡]

^{*}Grupo de Investigación en Física Aplicada, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Paraná
Avda. Almaguer 1033, E3100XAI Paraná, Argentina

[†]Instituto de Física del Litoral (UNL-CONICET)
Gral. Güemes 3450, S3000GLN Santa Fe, Argentina

¹nicolas.budini@ifis.unl.edu.ar

[‡]Universidade da Coruña, Centro de Investigacións Tecnolóxicas,
Campus de Esteiro S/N, 15403 Ferrol, Spain

²ajlopez@udc.es

Abstract—We analyzed small deflections ($\sim 1 \mu\text{m}$) of an opaque object by means of the double-exposure digital holographic interferometry technique, using an off-axis lensless Fourier holographic arrangement. The deflections were caused by heating the object with a flowing dc current. In our holographic arrangement, out-of-plane displacements of around 300 nm can be precisely detected by using a He-Ne laser as the coherent illumination source. However, this resolution could be improved by modifying the experimental setup or even choosing an appropriate object reference state. We briefly show the theoretical description of the technique and conduct experiments and simulations to test the results. Since the object we have studied in this work is a bimetallic strip, the obtained results point towards further research concerning precise temperature sensing devices.

Resumen—En este trabajo se analizaron pequeñas deflexiones ($\sim 1 \mu\text{m}$) de un cuerpo opaco mediante la técnica de interferometría holográfica digital de doble exposición, utilizando un esquema holográfico sin lente de Fourier fuera de eje. Las deflexiones fueron causadas por calentamiento del objeto mediante el flujo de una corriente eléctrica continua. Con el esquema experimental utilizado es posible detectar con buena precisión deflexiones perpendiculares al plano del objeto del orden de los 300 nm si se emplea un láser de He-Ne como fuente de luz coherente. Sin embargo, esta resolución podría ser mejorada si se modifica el esquema holográfico o incluso eligiendo un estado de referencia apropiado del objeto. Se muestra brevemente la descripción teórica de la técnica y se llevan a cabo experimentos y simulaciones para verificar los resultados. Dado que el objeto que estudiamos en este trabajo es un par bimetalico, los resultados obtenidos apuntan a investigar sobre el desarrollo de dispositivos para el sensado de temperatura.

I. INTRODUCTION

Holographic interferometry (HI) is a powerful technique for measuring small displacements or deformations of objects, and active research is being conducted in this field concerning diverse applications [1]–[3]. The double-exposure digital HI technique consists mainly in digitally recording two holograms of an object, with a CCD or CMOS sensor, and numerically reconstructing an interferogram to evidence small variations between exposures [4]. In general, hologram reconstruction methods involve several fast Fourier trans-

forms (FFT) and complex-matrix multiplications. Therefore, even in the case of high speed digital processing, algorithms should be as simple and fast to compute as possible. The most used hologram reconstruction methods are the Fresnel and convolution approaches [4], [5]. Both of these methods allow to extract phase information and generate an interference phase map (or interferogram) to evidence small displacements or deformations between an initial (or undeformed) and a final (or deformed) state [6].

In this work, we have analyzed small deflections of a commercial bimetallic strip while it was being heated by a flowing dc current. The observed deflections were in the order of $1 \mu\text{m}$. For this, we recorded holograms during heating by means of an off-axis digital lensless Fourier holographic arrangement. Subsequently, we employed the Fresnel reconstruction approach to obtain the interference phase maps at several stages of the deformation due to thermal loading. First, we briefly review the theoretical aspects of the technique and present the experimental details. Finally, we show the experimental and simulated results which allowed us to perform a quantitative analysis of the thermally induced deflection. These results set the basis for further research concerning development of precise temperature sensing devices.

II. THEORETICAL BACKGROUND AND EXPERIMENTAL DETAILS

Double-exposure digital HI consists in the acquisition of two digital holograms, $h_1(x, y)$ and $h_2(x, y)$, of an object in its undeformed and deformed states, respectively [4], [7]. Considering the Fresnel approach and a typical off-axis lensless digital Fourier holographic arrangement (as shown in Fig. 1) each hologram is reconstructed by means of a single FFT and complex-matrix multiplication, as [4]

$$\begin{aligned} H_1(\xi, \eta) &= C_1 \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2) \right] \mathcal{F}^{-1} [h_1(x, y)] \\ H_2(\xi, \eta) &= C_2 \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2) \right] \mathcal{F}^{-1} [h_2(x, y)]. \end{aligned} \quad (1)$$

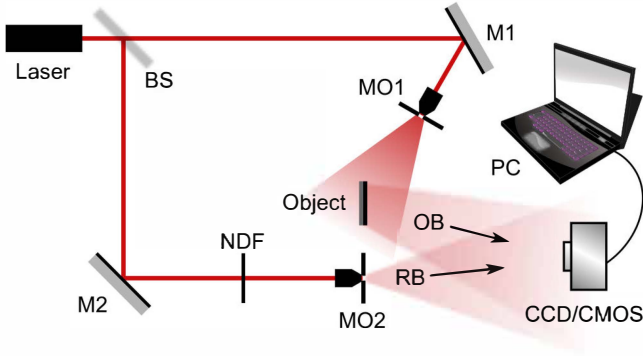


Fig. 1. Scheme of a digital off-axis lensless Fourier holography arrangement. Laser: He-Ne; BS: beam splitter; Mi: mirrors; NDF: neutral density filter; MOi: microscope objectives and pinholes; OB: object beam; RB: reference beam; CCD/CMOS: digital camera.

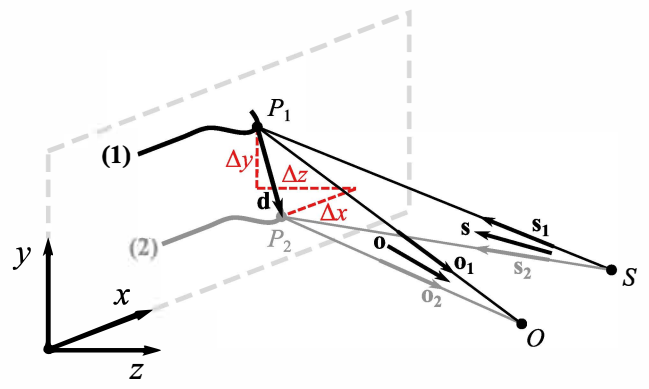


Fig. 2. Illustration of a general displacement or deformation of the object between (1) undeformed and (2) deformed states. An arbitrary point in the object moves as described by the displacement vector \mathbf{d} and modifies the path length of light from point S (illumination) to point O (observation).

Subscripts 1 and 2 correspond to each state, (ξ, η) are the coordinates on the object plane, (x, y) are the coordinates on the hologram plane, C_1 and C_2 are complex constants, λ is the wavelength used for hologram recording, d is the distance between the object and the hologram planes and $\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$ stands for a two-dimensional inverse FFT operation.

The constants and exponential factors in front of the FFT can be disregarded since they are subtracted out when computing phase differences [1], [8]. Thus, H_1 and H_2 describe the complex wavefronts at each state of the object, propagated back to the object plane (i.e. forming the virtual images). For HI measurements, the phases ϕ_1 and ϕ_2 at the object plane are recovered from (1) by means of

$$\begin{aligned}\phi_1(\xi, \eta) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_1(\xi, \eta)]}{\text{Re}[H_1(\xi, \eta)]} \right\} \\ \phi_2(\xi, \eta) &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_2(\xi, \eta)]}{\text{Re}[H_2(\xi, \eta)]} \right\}.\end{aligned}\quad (2)$$

Considering that the calculation of (2) yields values in the range $[-\pi, \pi]$, the wrapped interference phase map (interferogram) can be obtained by performing the following operation [6]

$$\Delta\phi(\xi, \eta) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[H_2(\xi, \eta)H_1^*(\xi, \eta)]}{\text{Re}[H_2(\xi, \eta)H_1^*(\xi, \eta)]} \right\}, \quad (3)$$

where the asterisk denotes complex conjugation. Subsequent filtering and unwrapping processes are generally needed to describe the actual object deformation or displacement with respect to its original state. The filtering operation is effectively achieved by implementing several iterations of a sine/cosine average filter [9].

A general (arbitrary) displacement or deformation can be schematized as shown in Fig. 2. Assuming the displacement of a point in the object to be described by $\mathbf{d} = \Delta x \hat{\mathbf{i}} + \Delta y \hat{\mathbf{j}} + \Delta z \hat{\mathbf{k}}$, the distance traveled by light from the illumination point, S , to the observation point, O , will differ by an amount

$$\Delta l = (\mathbf{o} - \mathbf{s}) \cdot \mathbf{d} \quad (4)$$

between both states [4]. Here, \mathbf{s} and \mathbf{o} are unitary vectors that bisect the angles formed by \mathbf{s}_1 and by \mathbf{s}_2 and \mathbf{o}_1 and \mathbf{o}_2 , respectively, at the undeformed and deformed states, respectively. In turn, \mathbf{s}_1 , \mathbf{s}_2 , \mathbf{o}_1 and \mathbf{o}_2 are also unitary

vectors pointing in the directions of light propagation from S to O (see Fig. 2). Equation (4) arises from the fact that light travels the distance $\overline{SP_1} + \overline{P_1O}$ at state (1) and the distance $\overline{SP_2} + \overline{P_2O}$ at state (2), as shown in Fig. 2. Thus, the path length difference between both states is $\Delta l = \overline{SP_1} + \overline{P_1O} - (\overline{SP_2} + \overline{P_2O})$. In terms of the unitary vectors this can be written as

$$\Delta l = \mathbf{s}_1 \cdot \overrightarrow{SP_1} + \mathbf{o}_1 \cdot \overrightarrow{P_1O} - \mathbf{s}_2 \cdot \overrightarrow{SP_2} - \mathbf{o}_2 \cdot \overrightarrow{P_2O}. \quad (5)$$

Using the small displacement approximation, $|\mathbf{d}| \ll \overline{SP_1}$, $\overline{SP_2}$, $\overline{P_1O}$ and $\overline{P_2O}$, the following approximations hold $\mathbf{s}_1 \approx \mathbf{s}_2 \equiv \mathbf{s}$ and $\mathbf{o}_1 \approx \mathbf{o}_2 \equiv \mathbf{o}$. Plugging these into (5) results in

$$\Delta l = \mathbf{o} \cdot (\overrightarrow{P_1O} - \overrightarrow{P_2O}) - \mathbf{s} \cdot (\overrightarrow{SP_2} - \overrightarrow{SP_1}). \quad (6)$$

Finally, taking into account that the displacement vector \mathbf{d} is given by $\overrightarrow{P_1O} - \overrightarrow{P_2O}$ and also by $\overrightarrow{SP_2} - \overrightarrow{SP_1}$, one gets the expression given in (4). Hence, the phase difference arising from the path difference Δl is given by

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= k\Delta l \\ &= \mathbf{S} \cdot \mathbf{d},\end{aligned}\quad (7)$$

where $k = 2\pi/\lambda$ is the modulus of the wave-vector and $\mathbf{S} = k(\mathbf{o} - \mathbf{s})$ is known as the sensitivity vector [4]. Thus, \mathbf{S} is fixed by the geometry of the holographic arrangement and determines the direction for which the system has maximum sensitivity (\mathbf{d} parallel to \mathbf{S}). On the contrary, the system has null sensitivity for displacements such that \mathbf{d} is perpendicular to \mathbf{S} .

For experiments we used an off-axis lensless Fourier holographic arrangement with a He-Ne laser light source (see Fig. 1) and observed the bimetallic strip while being heated by a flowing direct current. Current values were in the range between 0 and 100 mA. Hologram images were acquired with a 5 megapixels CCD camera and processed under the MATLAB® interface, by means of equations (1) to (3).

Simulations were also implemented in MATLAB®, following equations (4) and (7). For small deflections (in the order of a few wavelengths) one can model the deformation of the bimetallic strip as being approximately quadratic in shape. This served us to simulate the deformations and check

the experimentally determined deflection amplitudes. For simulations we have used as inputs the unwrapped phase values obtained from interferograms (see below for more details about simulations).

III. RESULTS AND DISCUSSION

We carried out experiments and simulations to analyze and quantify small deflections of a commercial bimetallic strip. In Fig. 3 we show an illustration of the bimetal under observation. The fixed support at the left side was considered as having a deflection equal to zero, while the free right side extreme was free to move and could be deflected as the bimetallic strip was heated by a current flow. The holographic arrangement was carefully aligned so the object surface was parallel to the CCD sensor in its undeformed state. In this way, the bimetal deflected directly towards the camera while being heated. Hence, we could assume the deformation to be almost entirely along the z -direction (see Fig. 2). This ensured the displacement vector to be $\mathbf{d} \approx \Delta z \hat{\mathbf{k}}$. With this, equation (3) becomes

$$\Delta\phi \approx S_z \Delta z. \quad (8)$$

We recall here that S_z stands for the z -component of the sensitivity vector, \mathbf{S} , which was determined from the experimental setup. This equation directly establishes that each time the phase increments in 2π , an abrupt jump is obtained in the interferogram and the deflection increases by an amount $\Delta z \approx 2\pi/S_z$. Therefore, as long as the phase variation is distinguishable from the background speckle noise it can be detected and quantified by this technique. However, a detailed analysis of the measurement error has to be performed for each particular case.

The interference phase maps of Fig. 4(a) were obtained as the bimetallic strip was heated by an increasing current. Fig. 4(b), in turn, shows the filtered phase maps after applying several iterations of the sine/cosine average filter. The filtering process eliminates the speckle noise fluctuations and enhances the $-\pi$ to π , or viceversa, phase jumps. Subsequent unwrapping procedures yield the actual deformation of the bimetal. The filtering procedure is essential to achieve a reasonable noise-free unwrapped phase map. By employing (7) we could quantify the deflections, obtaining values in the range between $1.0 \mu\text{m}$ to $2.8 \mu\text{m}$ for the maximum deflection amplitudes of the bimetallic strip. Relative errors are estimated to be well below 10%.

We make a short digression here: for really small deflections of the object ($< 200 \text{ nm}$) there will be no fringes

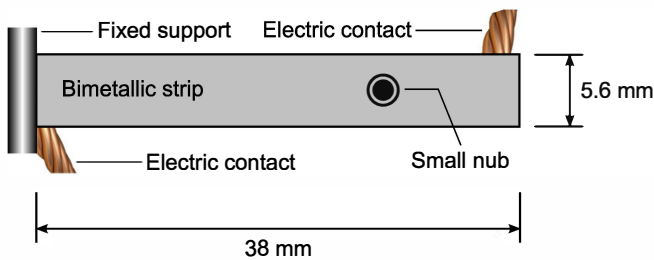


Fig. 3. Illustration of the bimetallic strip under observation. The left-side extreme was fixed and its deflections was assumed to be zero. The right-side extreme was free to deflect upon thermal loading.

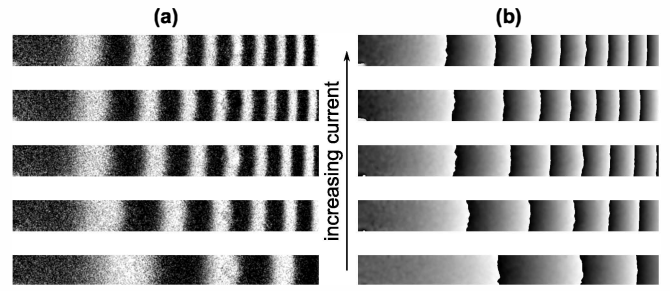


Fig. 4. Interference phase maps obtained for each current (a) before and (b) after performing the sine/cosine average filtering procedure.

at all in the phase maps, since the phase difference of the deflecting extreme between both states will be lower than π . However, if one chooses a more convenient reference state, the digital HI technique allows detecting such small deflections. This is shown graphically in Fig. 5. Here, by choosing (2) as the reference state, the deflection from (2) to (3), $d_{(2) \rightarrow (3)}$, is so small that no fringe is visible in the phase map and quantification turns difficult due to background noise. Anyway, by choosing (1) as the reference state instead of (2), the deflection $d_{(2) \rightarrow (3)}$ is easy to calculate by means of $d_{(2) \rightarrow (3)} = d_{(1) \rightarrow (3)} - d_{(1) \rightarrow (2)}$. This allows improving the resolution of the technique, but the applicability of this method will strongly depend on the experimental conditions.

Fig. 6 presents the unwrapped phase curves for each current, as a function of the position on the bimetallic strip. These curves were obtained by taking longitudinal profiles from the unwrapped phase maps of Fig. 4(b). As already said, the sine/cosine filtering procedure considerably reduces the speckle noise. Therefore, the profiles resulted really smooth, as seen in the curves, which are plotted by interpolating the experimental points with straight lines. The left-side vertical axis shows the deflection amplitudes in radians, as obtained directly from the unwrapping process, while the right-side vertical axis quantifies the physical deflection amplitudes as calculated from (8). The inset of Fig. 6 plots these amplitudes as a function of the flowing dc current values. A linear behavior of the deflection was seen for currents below 20 mA, and a quite different and

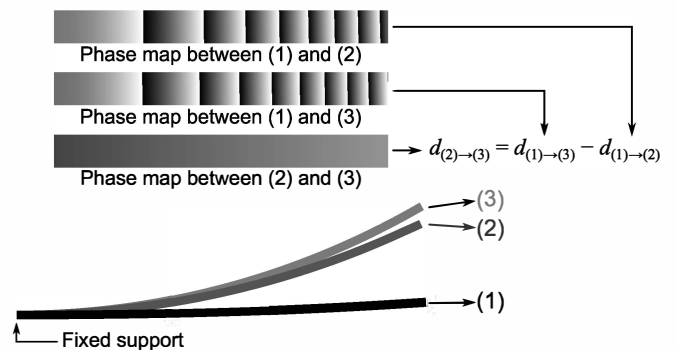


Fig. 5. Scheme showing the possibility offered by the digital HI technique regarding the detection of really small deflections or displacements. The deflection from state (2) to (3) would be hard to quantify if the (2) is taken as the reference state. However, if one takes (1) as the reference state, the deflection from (2) to (3) can be calculated as $d_{(2) \rightarrow (3)} = d_{(1) \rightarrow (3)} - d_{(1) \rightarrow (2)}$. This allows improving the resolution of the technique by taking an appropriate reference state.

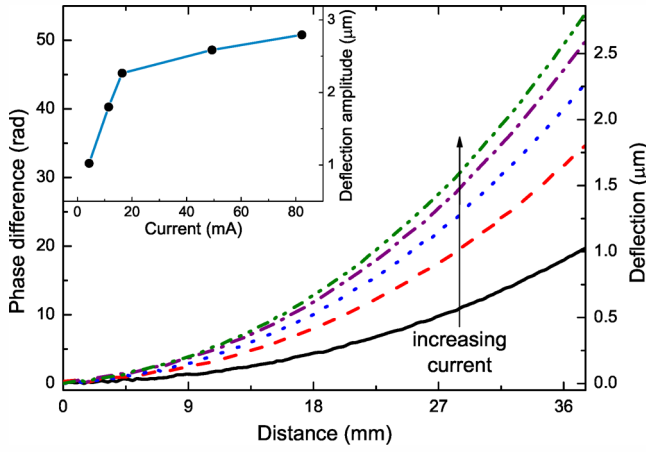


Fig. 6. Unwrapped phase curves for each current flowing through the bimetallic strip. The right-side vertical axis shows the physical deflection amplitudes, as calculated from (8). The inset presents the maximum deflections obtained as a function of dc current.

small slope (but still linear behavior) was obtained for higher currents.

As already mentioned, for the numerical simulations we took as inputs the phase values of the maximum deflections calculated from unwrapping the phase maps of Fig. 4(b). Simulations proceeded in a rather simple way and were based on determining the value of (4) and/or (5) for each point of the object. For this we took into account two experimental parameters, namely: the position of the camera and the position of the illumination beam pinhole. These parameters determined the vectors \mathbf{o} and \mathbf{s} , which in turn defined the sensitivity vector \mathbf{S} as shown in (4) and (5). The reference coordinate system was chosen to be centered in the object plane. The illuminated surface of the object was discretized in the (x, y) plane and treated as a matrix. This allowed us to simulate an arbitrary deformation by applying a displacement in the z direction to each object pixel, given by certain function $\Delta z = f(x, y)$. In our case, the deformation was of quadratic shape as a function of x , i.e. it had the general form $\Delta z(x) = a(x - x_0)^2$. With this, we constructed a displacement vector $\mathbf{d} = \Delta z \hat{\mathbf{k}}$ and, therefore, the calculation of (4) and (5) was straightforward. The deformation function $\Delta z(x)$ could be easily determined by knowing the deflection amplitude obtained from the experimental phase maps calculated from (1)–(3) and shown in Figs. 4 and 6.

The simulated wrapped phase maps are presented in Fig. 7. By comparing experimental and simulated results we could observe an excellent agreement, which allowed us to assert that the simulation represented quite well the quadratic deflection of the bimetallic strip. The most important deviation is observed after comparison of the experimental and simulated results for the $2.6 \mu\text{m}$ deflection. The observed difference in the simulated result, however, represents a relative error below 5% with respect to the experimental result.

The method presented in this work is applicable to an infinity of cases of study concerning the analysis of small deformations or displacements of opaque bodies. We have chosen a rather simple case, due to the predictable outcome,

but more complex situations could be also studied. The more complex the case the more difficult would be the analysis of the obtained data, due to the fact that the sensitivity vector is kept fixed while acquiring holograms. This implies that for a general three-dimensional deformation or displacement there will be three unknown parameters in (7), namely Δx , Δy and Δz . There are some alternatives to solve these issues, like acquiring three holograms and varying the sensitivity vector for each of them such that these vectors be linearly independent [4]. However, these problems are out of the scope of the present work. The results presented here served us to test our experimental setup and the numerical simulations aided us to corroborate the calculated small deflections, obtained from purely experimental parameters.

IV. CONCLUSION

We presented a quantitative analysis of small deflections by means of the digital holographic interferometry technique. We used an off-axis lensless Fourier holographic arrangement to observe how a bimetallic strip deflected under thermal loading. The heating was achieved by a flowing dc current through the bimetal, and we acquire holograms for several current values. After reconstruction of the holograms by means of the Fresnel approach we extracted the information related to phase and performed the corresponding operation to calculate phase differences. In this way, we obtained interferograms revealing the displacement of the bimetallic strip between the reference (undeformed) state and several thermally loaded (deformed) states. By carrying out adequate filtering and unwrapping procedures we could reconstruct the real deformation of the bimetal and calculate the deflection amplitude. If one assumes a deformation along the z -direction, the deflection can be quantified by knowing the S_z component of the sensitivity vector which depends exclusively on the holographic arrangement. To check the experimental results we have also performed computational simulations of the deflecting bimetallic strip, obtaining an excellent agreement between simulation and experiment. The results obtained in this work point towards further research concerning the possibility of developing highly precise temperature sensing devices.

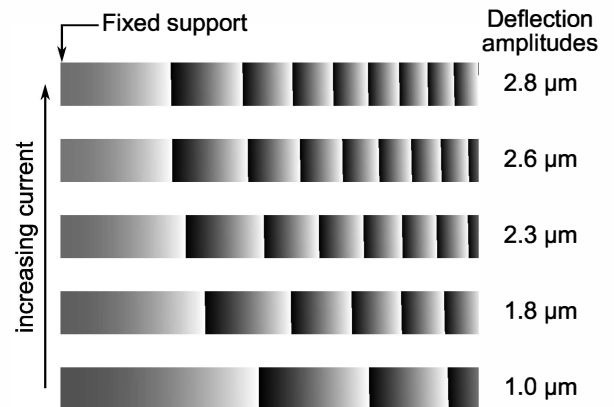


Fig. 7. Simulations of the bimetallic wrapped phase maps for each current. The results are in excellent agreement with the experimental results of Fig. 4(b).

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the joint project 25/K021 between Universidad Tecnológica Nacional (Argentina) and Universidade da Coruña (Spain).

REFERENCES

- [1] G. N. Oliveira, D. M. C. Rodrigues, L. C. S. Nunes, and P. A. M. dos Santos, "Digital Fourier transform holography applied to investigate mechanical deformation in polymers," *Opt. Laser Eng.* **50**, 1798 (2012).
- [2] A. Sánchez A., M. H. De la Torre Ibarra, F. Mendoza Santoyo, T. Saucedo-A., and D. Reyes R, "Simultaneous 3D digital holographic interferometry for strain measurements validated with FEM," *Opt. Laser Eng.* **52**, 178 (2014).
- [3] B. Wu, J. Zhao, J. Wang, J. Di, X. Chen, and J. Liu, "Visual investigation on the heat dissipation process of a heat sink by using digital holographic interferometry," *J. Appl. Phys.* **114**, 193103 (2013).
- [4] U. Schnars and W. P. O. Jüptner, "Digital Holography," (Springer-Verlag, Berlin, 2005).
- [5] T. Demetrakopoulos and R. Mittra, "Digital and optical reconstruction of images from suboptical diffraction patterns," *Appl. Optics* **13**, 665 (1974).
- [6] T. Kreis, "Handbook of Holographic Interferometry," (Wiley-VCH, Weinheim, 2005).
- [7] J. L. Valin, E. Gonçalves, F. Palacios, and J. R. Pérez, "Methodology for analysis of displacement using digital holography," *Opt. Laser Eng.* **43**, 99 (2005).
- [8] M. Takeda, K. Taniguchi, T. Hirayama, and H. Kohgo, "Single transform Fourier-Hartley fringe analysis for holographic interferometry," in *Simulation and Experiment in Laser Metrology*, Z. Füzessy, W. Jüptner, and W. Osten, eds. (Akademie Verlag, Berlin, 1996), pp. 67–73.
- [9] F. Palacios, E. Gonçalves, J. Ricardo, and J. L. Valin, "Adaptive filter to improve the performance of phase-unwrapping in digital holography," *Opt. Communications* **238**, 245–251 (2004).

Development of an undergraduate optics laboratory based on the analysis of digital images

Alberto Ramil^a, Ana J. López^a, M. Paula Fiorucci^a and Fabio Vincitorio^b

^a Centro de Investigaciones Tecnológicas, Escola Politécnica Superior, Universidade da Coruña, Campus de Ferrol, 15471 Ferrol, Spain;

^b Facultad Regional Paraná, Universidad Tecnológica Nacional, Almafuerite 1033, Paraná, Entre Ríos, Argentina

ABSTRACT

The aim of this work is to present an experience based on the use of digital images and computer processing techniques for enhanced optics laboratory teaching aids. The use of digital images offers the possibility of analysing some phenomena quantitatively, which would be very difficult to do with the traditional equipment available in teaching labs. In order to obtain high quality teaching material, a number of practical aspects should be taken into account during the process of image acquisition and subsequent analysis. Examples of quantitative experiments are presented; they cover the usual topics at undergraduate level, both geometrical and physical optics and even spectral analysis of the light.

Keywords: teaching optics, digital images, optics laboratory, quantitative analysis, image-processing tools

1. INTRODUCTION

The use of digital images to demonstrate basic concepts in physics was initiated in the nineties and has been increased in the last years because of the low cost of digital cameras and the development of software tools (both commercial and shareware) that ease the image processing.^{1,2} In teaching optics, the use of digital images has been previously reported³⁻⁵ and it offers the possibility of analysing some phenomena quantitatively, which would be very difficult to do with the traditional equipment available in teaching labs. However, the success of the experience depends on the possibility of obtaining numerical values from the images and it largely depends on their quality and characteristics.

This communication presents a detailed analysis of some practical aspects concerning the image acquisition process and its influence on the success of different experiments. The experiments cover the usual topics in an undergraduate optics lab; i.e. both geometrical and physical optics, including spectral analysis of the light. We have implemented them so that they can be easily studied in a more quantitative manner, using the advantages of digitized images. Moreover, examples of quantitative data analysis are discussed, which demonstrates the high degree of accuracy that can be achieved with simple equipment in a teaching lab.

In experiments which require the measurement of length, it is necessary to include a ruler or an object of known length for the conversion between length and number of pixels in the digital image. There are several ways to perform this transformation. A straightforward way is to use a graphics program, such as MS Paint.⁶ By placing the mouse on the reference scale, it is simple to convert from pixel coordinates to real dimensions. There are also several commercial programs as Matlab®, VideoPoint®^{7,8} and shareware as Phyton, PixelProfile and others⁹⁻¹¹ that can directly convert the pixel coordinates of the picture into real coordinates. Alternatively, it is possible to write a spreadsheet program so that by clicking on a digital image imported into the program, the pixel coordinate will be given in the spreadsheet. The selection of the tool will depend on the type and depth of the analysis required and on the programming skills of the students.

Further author information: (Send correspondence to A.R.)

A.R.: E-mail: alberto.ramil@udc.es, Telephone: 34 981 337400

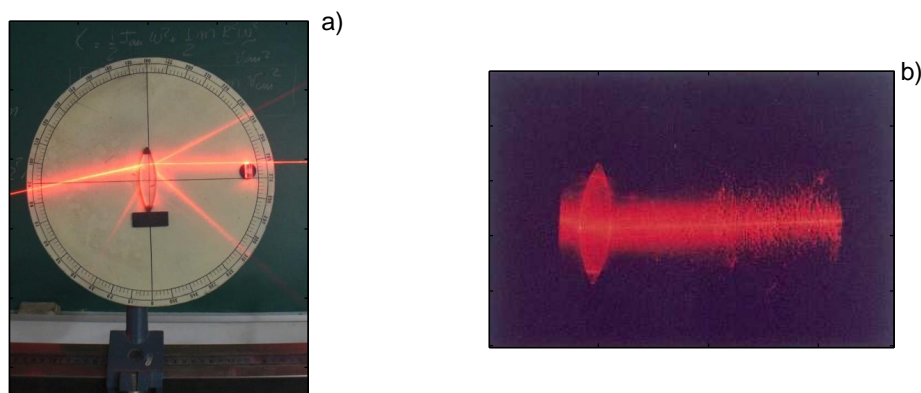


Figure 1. Light rays emerging from a lens with ambient light and smoke as dispersive media (a). A scope of the same experiment performed in full darkness (b).

2. DISCUSSION

First of all, a number of aspects concerning the camera should be discussed in order to improve the image quality. The camera should allow us to select the exposure, aperture and focus. In some cases, it will be possible to use the automatic mode but, owing to the low levels of illumination in optics experiences, it could be necessary to use the manual mode. In physical optics experiences such as diffraction, the intensity pattern depicts a non-uniform distribution. If the camera presents an autosetting in the exposure time, the relative intensities of the peaks are correctly represented only for lateral side maxima, while the bright central peak results automatically reduced in intensity below the sensor saturation threshold.¹² On the contrary, an *ad-hoc* adjustment of the time exposure allows us to obtain images where many side peaks are correctly captured.

Other practical aspects that must be taken into account concern either lighting or the background. With regards to lighting, it should be tenuous enough to handle the camera but not to disturb the light from the experiment. Fig. 1a shows an image of light rays emerging from a lens with ambient light and smoke as dispersive media. Fig. 1b depicts a scope of the same experiment performed in full darkness. As it can be appreciated, the ambient light reduces the dispersion caused by the lens and improves the image. Regarding the background, it is convenient to use of a soft, uniform tone in contrast with the object and the colour of the light source used; although in the case of physical optics, the use of a background it is not necessary because the image will be focused on the pattern.

2.1 Geometrical optics

Experiments in geometrical optics are mainly concerned with the study of phenomena and laws of reflection and refraction, determination of the focal length of mirrors and lenses or the image-forming in mirrors. These experiments involve the trace of light rays paths. Materials used comprise acrylic lens, metallic mirrors of large size and incandescent lamps with multiple slits to obtain collimated beams. In certain cases, it is convenient the use of coloured filters for distinguish the different rays as it can be seen in Fig. 2. To select the most adequate conditions for image acquisition of the ray paths, preliminary tests should be accomplished, although, in some cases, the images could be improved by photo editing software. Fig. 3a and Fig. 3b show the same image before and after shine adjustment.

Tracing light rays and subsequent analysis can be done using software tools with different levels of automation. VideoPoint® is a friendly tool which allows us to extract the point coordinates of the light rays. The intersection of the ray paths can be calculated by using a spreadsheet. Moreover, by using Matlab® functions not only coordinates could be determined but also calculations to trace the rays and to determine the characteristics of the optical element could be accomplished, as it is shown in Fig. 4a and Fig. 4b.

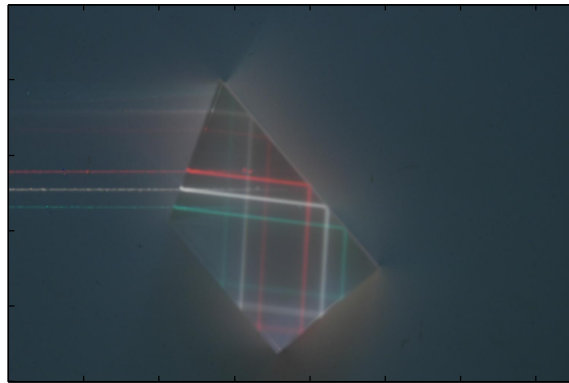


Figure 2. Multiple reflections in a prism using coloured light rays.

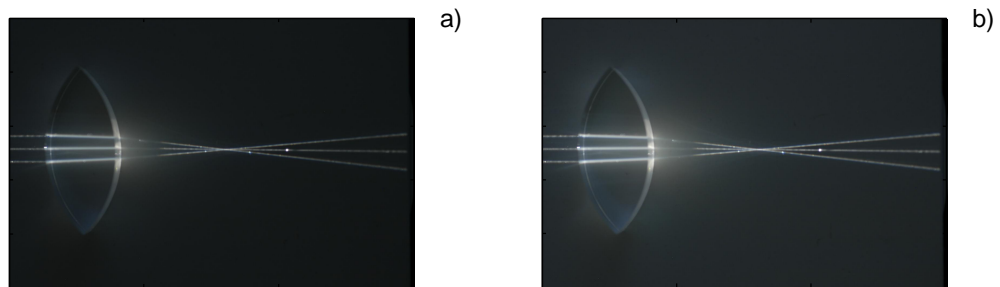


Figure 3. Ray light paths in a convergent lens. Original image (a). Image obtained varying the shine by photo editing software (b).

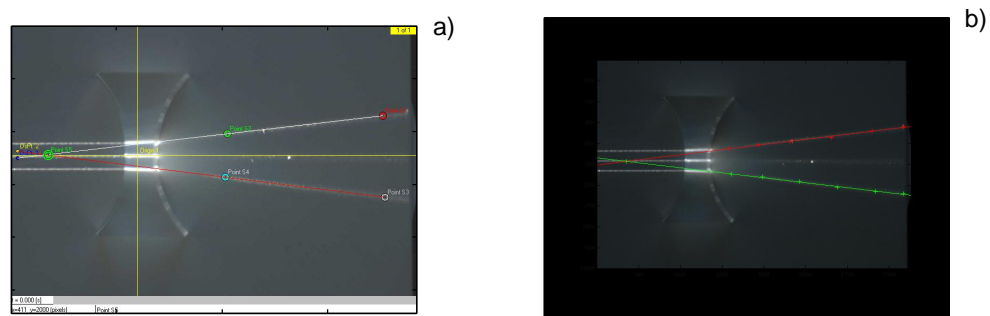


Figure 4. Trace of ray paths with VideoPoint®(a), and using Matlab®(b).

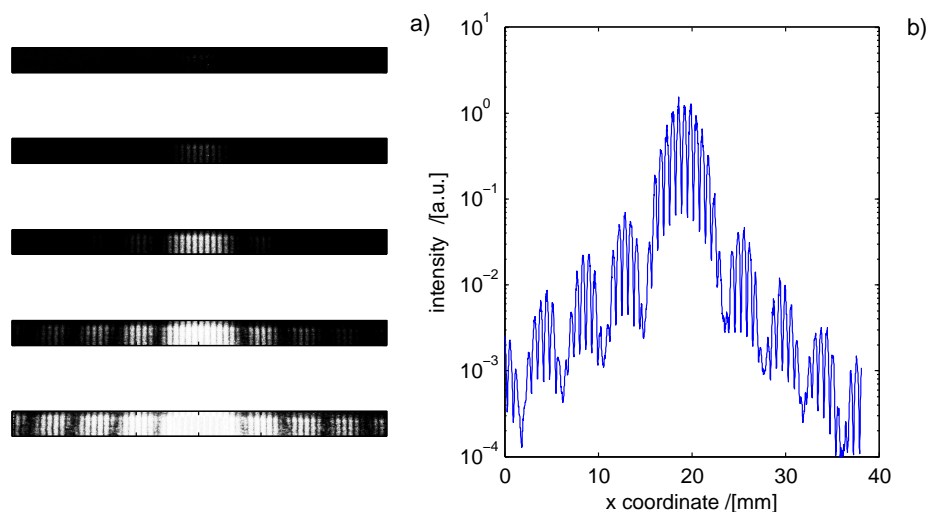


Figure 5. Double slit images with different exposure times (from top to bottom 1/4000, 1/250, 1/15, 1 and 15 s) (a). Intensity profile reconstructed using unsaturated pixels of previous images (b).

2.2 Physical optics

As it has been mentioned above, one of the problems in the use of digital cameras is the saturation of the pixel signals. Some authors have alleviated this problem by using filters to reduce the intensity of the light reaching the CCD. However, in cases such as diffraction phenomena, there are dramatic differences between the intense central spot and secondary maxima and thus, the use of filters can lead to a loss of information about the less intense areas and makes it difficult to perform quantitative analysis.

In a previous work, an alternative method was proposed.¹³ It is based on the combination, pixel by pixel, of a series of images with exposure times that are adequate to measure the different intensity levels in the diffraction pattern. Most digital cameras record images in a JPEG file, which can be read by photo editing software, which works with the 24 bits in RGB format or 8 bits in grey-scale. It is possible to enhance the range of intensities over the 8 bits by combining the different images and thus, obtain the intensity profile of the complete diffraction pattern. The resultant image contains the intensity of each pixel corresponding to the picture with higher exposure without saturation.

Measurements for single slits, double slits and circular holes were recorded and the intensity profiles fitted to theoretical curves. Fig. 5 and Fig. 6 depict experimental data and the fit to Fraunhofer approximation curves for a double slit experiment. Fig. 7 shows a similar procedure for a circular hole.

By following this procedure, students can quickly and routinely record diffraction patterns. Simple calibrations allow them to convert pixel numbers to position values with a high degree of accuracy. This technique can also be used for other photometric applications.

2.3 Spectral analysis

Digital cameras can be also used to analyse the spectra of light. The objective of this experiment is to measure the wavelength of some of the prominent spectral lines of both known and unknown elements by means of a grating spectrometer. In our case, a grating spectrometer was arranged by using a single slit which acts as a collimator to produce a parallel beam of light from the source, a grating to diffract the light and a glass diffuser where the spectra is projected. The camera is focused on the glass to record the spectra. Different spectral lamps and discharge tubes can be used.

First of all, it is necessary to calibrate the spectrometer using known wavelengths to determine the relationship between wavelength and pixel number. Fig. 8e depicts the calibration curve obtained by using the emission lines of Hg lamps (435.8 nm, 546.1 nm and 578.2 nm) and Na lamps (589.3 nm).

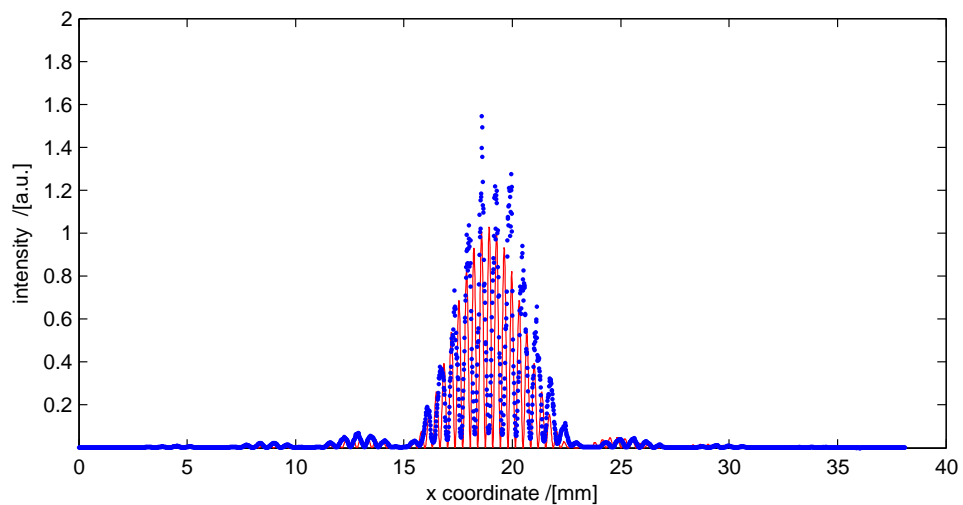


Figure 6. Double slit fit to Fraunhofer approximation.

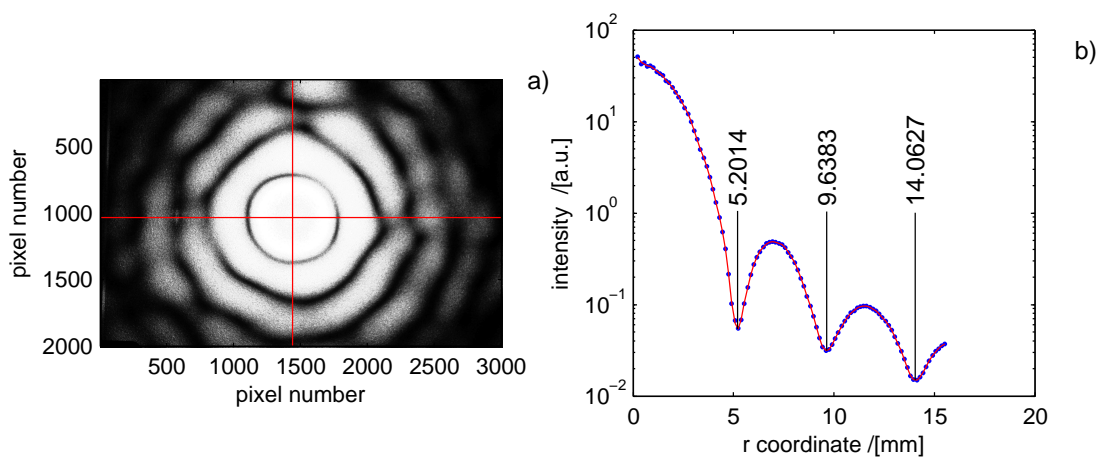


Figure 7. Diffraction pattern of a circular aperture (a), and its radial distribution of intensities (b). The location of the minima is proportional to the sequence of the Bessel function zeroes: 3.831705970, 7.015586670, 10.17346814.

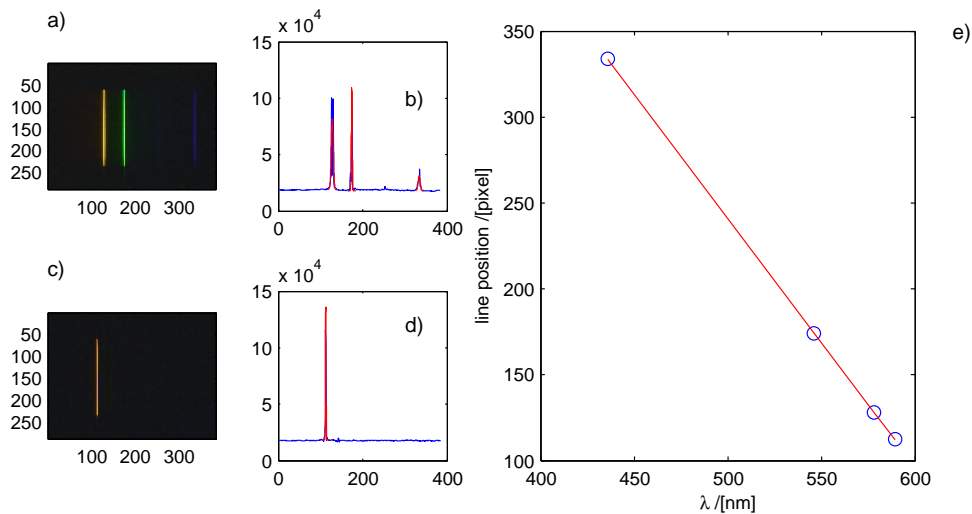


Figure 8. Images and their spectra from mercury vapour light source (a)-(b), and from low pressure sodium light source (c)-(d). Calibration curve obtained with the blue, green and yellow lines of mercury (wavelength $\lambda=435.8$, 546.1 and 578.2 nm) and the sodium yellow line (wavelength $\lambda=589.3$ nm) (e).

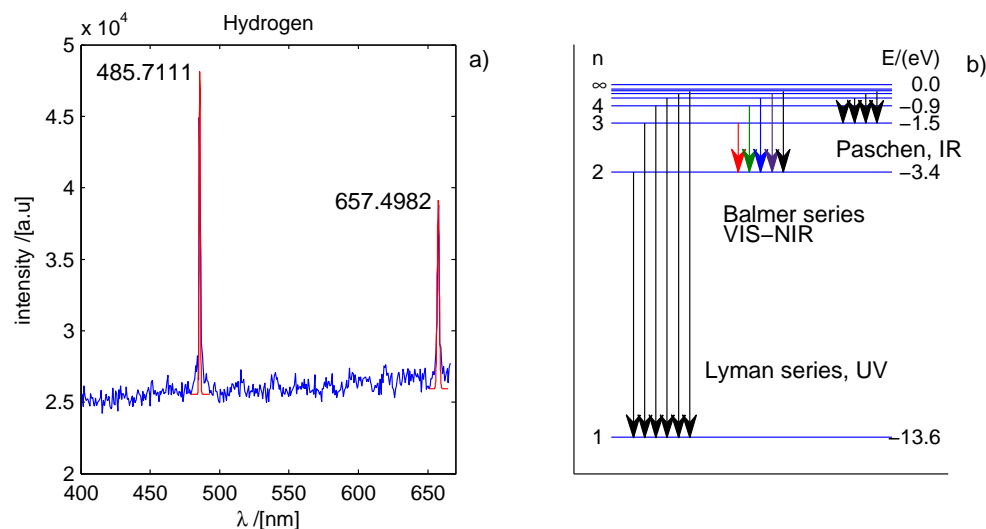


Figure 9. Spectrum of hydrogen discharge tube with red and green lines(a). The hydrogen spectra lines diagram with the visible Balmer lines (wavelength $\lambda=656.11$, 486.01, 433.94, 410.07 and 396.91 nm) (b).

Once the spectrometer is calibrated, it is possible to identify the emission spectra of different elements. In Fig. 9a spectral lines of a hydrogen tube are shown. The wavelength window ranges 400.98 nm to 666.16 nm. The energy levels of the spectral lines observed correspond to transitions in the Balmer series, $n = 3 \rightarrow n = 2$, and $n = 4 \rightarrow n = 2$, as it is shown in Fig. 9b.

3. CONCLUSIONS

The use of digital imaging and computational techniques opens a wide range of possibilities to improve optical teaching laboratories. In order to obtain high quality teaching material, images must present certain requirements. A number of points involving lighting, scales or camera settings among others should be taken into account during the process of image acquisition. Special attention requires the phenomenon of saturation of the

pixels in the CCD that mainly affects diffraction experiments.

In this work, we have presented different optical experiments that can be easily studied in a more quantitative manner with the aid of a digital camera. These experiments cover the usual topics at undergraduate level, ranging from elementary topics in ray theory for light to more advanced subjects as Fraunhofer diffraction or spectral analysis. However in all cases the analysis can be done with high degree of accuracy owing to the use of digital images and adequate software tools.

ACKNOWLEDGMENTS

This unnumbered section is used to identify those who have aided the authors in understanding or accomplishing the work presented and to acknowledge sources of funding.

REFERENCES

- [1] Elliott, K. H. and Mayhew, C. A., "The use of commercial ccd cameras as linear detectors in the physics undergraduate teaching laboratory," *Eur.J.Phys.* **19**(2), 107–117 (1998).
- [2] Gil, S., Reisin, H. D., and Rodriguez, E. E., "Using a digital camera as a measuring device," *Am. J. Phys.* **74**(9), 768–775 (2006).
- [3] Wein, G. R., "A video technique for the quantitative analysis of the poisson spot and other diffraction patterns," *Am. J. Phys.* **67**(3), 236–240 (1999).
- [4] Deizarra, C. and Vallee, O., "On the use of linear ccd image sensors in optics experiments," *Am. J. Phys.* **62**(4), 357–361 (1994).
- [5] Vannoni, M. and Molesini, G., "Speckle interferometry experiments with a digital photcamera," *Am. J. Phys.* **72**(7), 906–909 (2004).
- [6] "Microsoft paint overview," http://www.microsoft.com/resources/documentation/windows/xp/all/proddocs/en-us/mspaint_overview.mspix?mfr=true, (accessed 15-jun-2013).
- [7] "Matlab overview," <http://www.mathworks.com/products/matlab/index.html>, (accessed 15-jun-2013)
- [8] "Videopoint web page," <http://www.vpfundamentals.com/1about.html>, (accessed 15-jun-2013)
- [9] "Python web page," <http://www.python.org/>, (accessed 15-jun-2013)
- [10] "Pixel profile web page," <http://www.efg2.com/Lab/ImageProcessing/PixelProfile.htm>, (accessed 15-jun-2013)
- [11] "Tracker web page," http://www.cabrillo.edu/~dbrown/*tracker/, (accessed 15-jun-2013)
- [12] Rossi, M., Gratton, L. M., and Oss, S., "Bringing the Digital Camera to the Physics Lab," *The Physics Teacher* **51**, 141–143 (2013).
- [13] Ramil, A., Lopez, A. J., and Vincitorio, F., "Improvements in the analysis of diffraction phenomena by means of digital images," *Am. J. Phys.* **75**(11), 999–1002 (2007).

Biospeckle Activity Evolution of Strawberries

Cecilia Mulone^{1*}, Nicolás Budini^{1,2}, Fabio Miguel Vincitorio¹, Carlos Enrique Freyre¹, Ana Jesús López³, Alberto Ramil³

¹ Applied Physics Research Group, Facultad Regional Paraná (UTN), Av. Almaguer 1033, E3100XAI Paraná, Argentina.

² Instituto de Física del Litoral (UNL-CONICET), Güemes 3450, S3000GLN Santa Fe, Argentina.

³ Universidade da Coruña, Escuela Politécnica Superior, Av. Esteiro S/N, Ferrol, Spain.

*Corresponding author: ceciliamulone@gmail.com

Abstract:

In this work, we measured the biospeckle activity of strawberries (*fragaria* × *ananassa*) with two recently developed algorithms. We observed an important diminution of speckle activity within time periods of 72 h. We tested the methods by analyzing different specimens to check for proper detection of bruised areas or fungal development. The obtained results serve as a starting point to correlate the time evolution of biospeckle activity with aging of fruits, in order to set the basis for development of future standardized fruit quality control procedures.

Keywords:

Biospeckle; Dynamic speckle; *Fragaria* × *Ananassa*; Fruit Aging; Mobility Index

1. INTRODUCTION

Visual or photographic images of objects illuminated by an expanded laser beam are covered with a grainy structure that is known as *speckle pattern* or *speckle field*. A speckle pattern consists of light spots with variable intensities and sizes, randomly distributed along the illuminated area. The observed intensity distribution presents no obvious relation to the properties of the surface being illuminated but strongly depends upon the viewing system [1]. The causes originating speckle patterns were recognized to lie in the coherence of the laser light and in the roughness of any surface not ideally specular. As understanding of this phenomenon was developed, several new measurement techniques evolved and were grouped under the denomination of *speckle methods*. Speckle patterns are known to possess information about the illuminated object at a scale below that of the wavelength used (usually called interferometric precision) [2], and that is what speckle methods take advantage of. A speckle pattern is termed dynamic or static, respectively, whether it changes spontaneously or not in a reasonably small time scale (say equal or less than 1 s). A dynamic pattern is usually seen when illuminating biological samples, and thus called *biospeckle*, while static patterns are generally associated with inorganic samples. In the latter case, speckle interferometry methods [3, 4] serve to study small deformations or displacements by comparing the patterns of the sample at two different states, before and after introducing an external perturbation. On the contrary, biospeckle methods are based on studying the spontaneous speckle pattern time evolution of the sample under study [5]. The term biospeckle activity (BA) is generally used to determine the degree

of mobility of the speckle pattern.

The surfaces of most materials (organic or inorganic) are rough on the scale of an optical wavelength (~ 600 nm). Therefore, in the particular case of organic samples, when laser light with a wavelength above 600 nm is used to illuminate them, the BA does not only depend on its surface but also on its inner tissues. This is due to the penetration depth of light near the bottom edge of the infrared range in biological tissue. As an example of this, the penetration depth of light with a wavelength above 600 nm in apple peel is higher than 2 mm [6]. There are several methods to analyze the temporal evolution of dynamic speckle patterns [7–9]. Pajuelo *et al.* have applied dynamic speckle methods to analyze bruising in apples [10]. Transient processes of melting ice cream have been evaluated also by means of dynamic speckle methods by da Silva Jr. *et al.* [11]. In turn, Kurenda *et al.* investigated temperature effects on apples for fruit quality assessment [12] and recently Amaral *et al.* have used dynamic speckle methods also to evaluate and predict beef quality [13]. However, a clear understanding, a consistent explanation and a standardized method to quantify the BA of fruits and correlate it to fruit quality are still lacking.

In this work we present results obtained from the BA analysis of strawberries, which are amongst the most consumed fruits throughout the world (information extracted from Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.fao.org>) and suffer from rapid post-harvest maturation and aging processes [14]. Therefore, assessment of their quality and estimated shelf-life turns relevant, while, to our knowledge, there is no optical study performed by means of dynamic speckle methods on strawberries. Through the application of two recently developed algorithms for biospeckle analysis [15] we have inspected the correlation between the BA value and the aging or quality characteristics of the fruit, while maintained at room temperature conditions.

2. EXPERIMENTAL DETAILS

2.1 Image Acquisition Setup

A 30 mW diode laser ($\lambda=650$ nm) was used as a coherent illumination source and the laser beam was expanded by simply removing the front collimating lens. The fruit was directly illuminated by the expanded beam without diffusers, as can be observed in the simplified scheme of **Figure 1**. A CMOS camera with a 1 megapixel resolution was used to record the image sequence of the subjective dynamic speckle patterns formed on the surface of the fruit.

The image acquisition procedure involved three main parameters [15], namely: (i) the number of frames per observation, N (≥ 2), used to calculate the BA value at a given instant, (ii) the time period between those N frames, τ , whose lowest value is limited by the highest temporal resolution attainable by the camera, being generally much greater than the dynamic speckle correlation time (typically $\leq 10^{-4}$ s) [16], and (iii) the time period, t , between subsequent calculations of BA values.

2.2 Speckle Processing Algorithms

For the digital processing of the biospeckle patterns we used two simple algorithms developed in the MATLAB® interface, whose details can be found in [15]. Both algorithms yield a single BA value for the desired region of the sample under analysis. This fact becomes advantageous, since the vast majority of biospeckle evaluation methods provide a matrix of BA values instead (see, for example, [17] and [18]). We proceed now with a brief description of them.

The first method is based on the generalized differences (GD) [19] and Fujii [20] methods. It consists

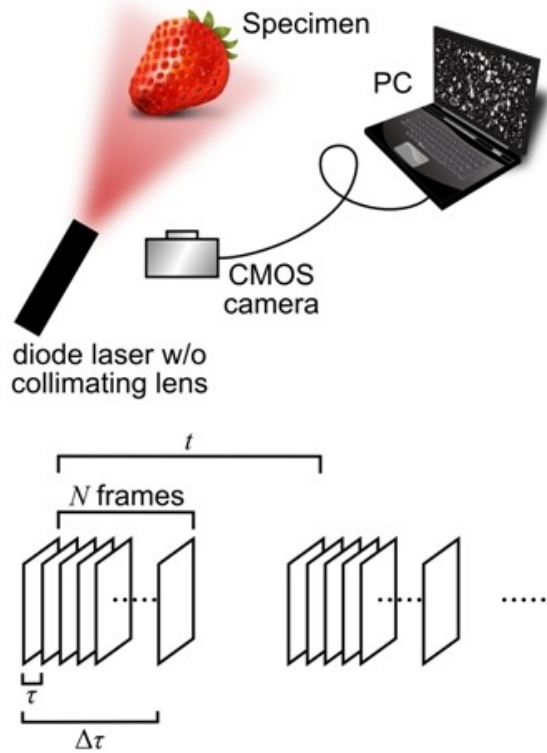


Figure 1. Simplified scheme of the optical setup and the main parameters involved during image acquisition. The diode laser beam is expanded by removing its collimating lens. Each image sequence involves the acquisition of N frames, with a time interval τ between them. From this sequence, a single BA value is calculated for a time instant of length $\delta\tau = (N - 1)\tau$. This is repeated after a time t , to measure the time evolution of BA.

on averaging differences between pixel intensities of subsequent speckle images. Therefore, differing from GD or Fujii, this method allows to easily get a single BA value index and quantify the overall degree of mobility of the dynamic speckle pattern at a given time instant of length $\Delta\tau = (N - 1)\tau$ (see **Figure 1**). Mathematically, the algorithm can be expressed as

$$BA_1 = \frac{1}{m \times n} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)|, \quad (1)$$

where BA_1 stands for the BA value obtained from the first method, m and n are the number of rows and columns of each image, respectively, $I_k(i, j)$ is the (i, j) component of the k -th image and N is the number of frames in the sequence. Hence, the BA value calculated in this way measures the image-to-image area averaged absolute pixel intensity variation.

In turn, the second method quantifies the BA by measuring the average fraction of pixels whose intensities change from image to image in more than a certain amount, which we call *speckle noise*. If a speckle pattern is ideally static, i.e. if there is no mobility at all, this fraction would be obviously zero. In the real case, each speckle pattern, whether static or dynamic, is most probably affected by some degree of noise coming from different sources (vibrations, ambient dust, electronics, thermal fluctuations, and so on). The amount of noise of the acquisition system may be estimated in several ways by measuring the variation of pixel intensity in a speckle pattern which *a priori* should be static. We have estimated the noise level, r , by means of taking the maximum pixel to pixel absolute intensity variation in a region R of the N images where the speckle pattern is supposed to be static. Mathematically this is expressed as

$$r = \max_{k=1 \dots N-1} \{ |R(i, j)_{k+1}^{static} - R(i, j)_k^{static}| \}, \quad (2)$$

where k covers all possible values from 1 to $N - 1$ and now i and j sweep over all pixels of region R . The *static* superscript remarks the fact that this calculation has to be performed on a region R of the N images where the speckle pattern must be nearly static. Once the noise level is approximated, the algorithm proceeds with the following operation

$$BA_2 = \frac{1}{m \times n} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Theta[|I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)| - r], \quad (3)$$

where now the BA_2 value is the result obtained from the second method, the scaling factor $(m \times n)^{-1}$ transforms the obtained quantity to the desired area fraction of varying pixels, $\Theta[x]$ is the well-known Heaviside function and, obviously, by multiplying this quantity by 100 we get a percentage value.

2.3 Analyzed Samples

We analyzed four different strawberries (*fragaria* \times *ananassa*) which will be referred as A , B , C and D from now on. Samples B , C and D were taken from the same stock to ensure they have the same age, while sample A was extracted from a totally different stock. Strawberries have a quick ripening process, as mentioned before, for which we expected to detect significant BA variations during a few days.

Sample A was analyzed by calculating first its BA value at $t = 0$ h and then at $t = 24$ h. Each time, a sequence of $N = 10$ photographs was acquired with a time interval $\tau = 1$ s between them (see **Figure 1**). For the rest of the samples, the BA calculation was performed every ($t =$) 30 min, taking also $N = 10$ photographs separated by a $\tau = 1$ s time interval. In this way, sample B was observed during 87 h, sample C during 92 h and sample D during 74 h. Sample D was frozen at -12 °C for 24 h previous to the experiment, in order to hasten the ripening process.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Sample A was used as a test for the algorithms and allowed us to prove that the BA values diminished appreciably from one day to the next by making only two observations, separated by a 24 h period. The BA_1 value dropped from 3.0 to 1.9, while the BA_2 value decayed from 65% to 28%. Relative errors were around 10% in both cases. In **Figure 2** we present the image representations of sample A , obtained by means of extracting data from the first algorithm, at the (a) first and (b) second day of observation.

These images clearly show that as cellular activity decayed from one day to the next, the image definition deteriorated at some regions of the strawberry. This could be observed easily with the naked eye and was further confirmed by calculating the pixel intensity mean value, which underwent almost a 40% diminution between both states. The BA_1 values obtained for sample B ranged between 10.0 and 7.2, with relative errors below 6%. In turn, we obtained BA_2 values starting at 84.4% and decreasing to 70.5% with also a maximum relative error of 6%.

In **Figure 3** we present the BA curves obtained from both methods, showing the decreasing trend for sample B as a function of time. There is a slight fluctuation above and below the average trend curves, but the monotonous overall diminution is clear. The curves have a similar shape, which evidences that both algorithms are consistent with each other. It is worth noting that these values are quite high in relation to those of sample A , but we recall here that this sample was brought from a different strawberry stock.

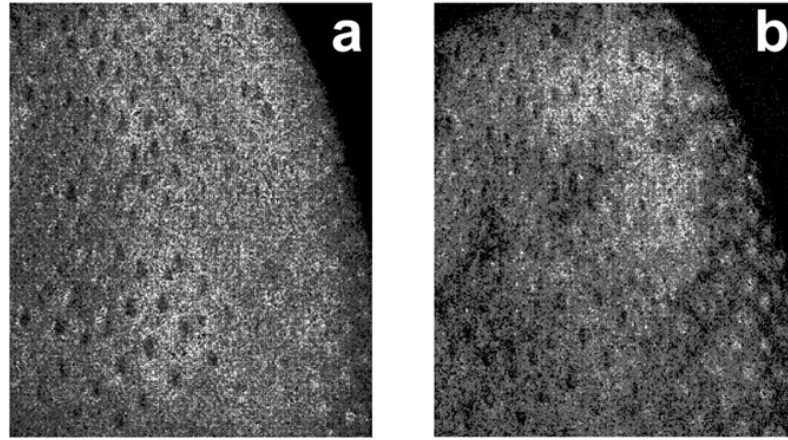


Figure 2. Images of sample *A* reconstructed from the first algorithm at (a) the first day and (b) the second day. The appearance of black zones in (b) denotes BA diminution.

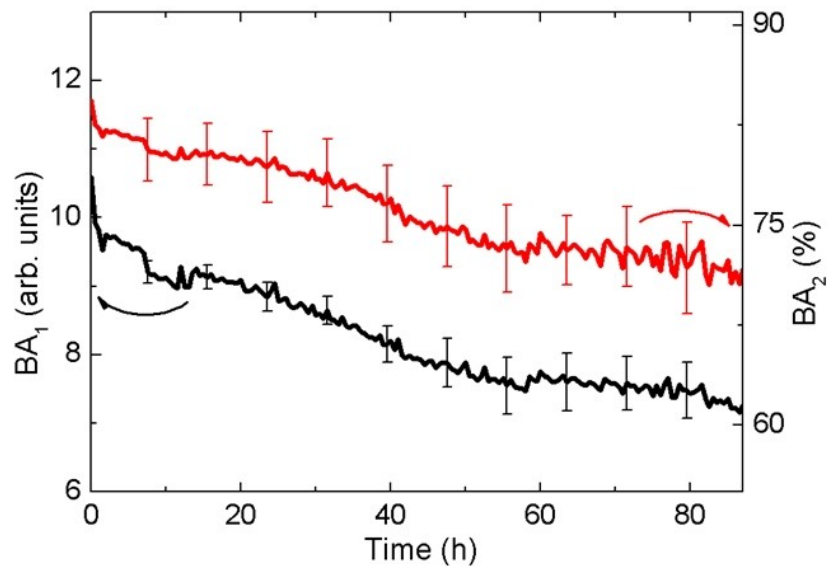


Figure 3. Evolution of BA values for sample *B* as a function of time, obtained by both methods. The curves present nearly the same monotonous diminution trend during 87 h of observation.

The BA_1 calculations for sample *C* yielded values in the range between 5.0 and 1.2, while BA_2 values ranged between 87% and 43%. Relative errors were quite high (reaching 60%) for this strawberry when calculating BA_1 values. In turn, relative errors for BA_2 were much lower and around 10%. The evolution of BA_1 and BA_2 values through the 92 h observation period is shown in Figure 4. This sample was characterized by the existence of a black region in its surface, which was intentionally put facing the camera to analyze the influence on the obtained BA values of surface defects on the fruit. This region corresponded, in this particular case, to a bruised area. Therefore, this explains the fact that the BA values for sample *C* were lower than those obtained for sample *B*. We also observed for sample *C* a monotonous BA diminution during approximately 60 h, followed by a slight increment for longer times. This unexpected behavior conducted us to analyze the cause for that, for which we just continued observing the fruit.

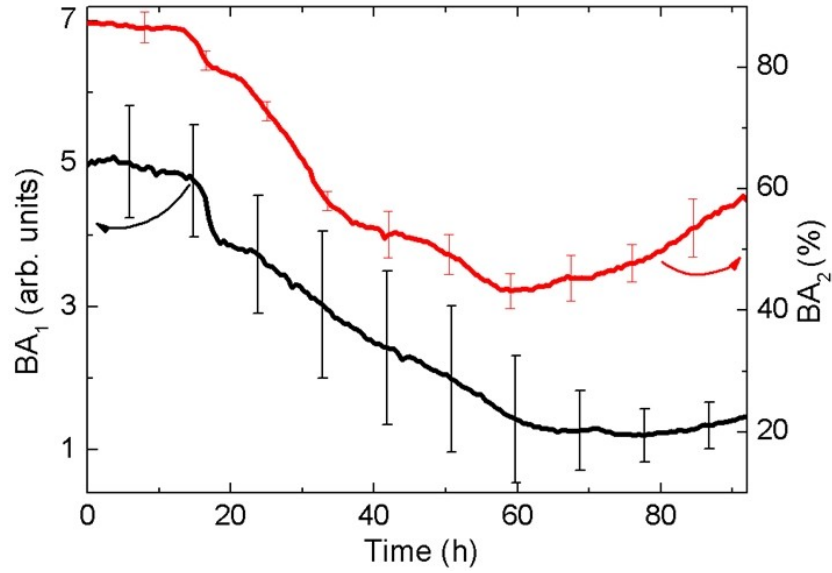


Figure 4. Evolution of BA values for sample *C* as a function of time, obtained by both methods. The curves presented a reversal of the decaying trend, which was due to growth of fungi colonies as was visually confirmed after continued observation of the fruit.

Remarkably, we noticed the appearance of fungi in the initially bruised region to which we attributed the reversal of the BA diminishing trend. The detection of fungi by means of dynamic speckle methods has already been reported by other authors [17].

Sample *D*, which was previously frozen, yielded BA_1 values ranging between 9.0 and 0.6 and BA_2 values decreasing from 81% to 10%. Here again, relative errors for BA_1 reached values as high as 65% and remained below 20% for BA_2 . The BA evolution curves are shown in Figure 5. Both curves presented an important diminution during the first 5 h period and continued to decrease subsequently at a lower rate. After 40 h of observation, the diminution rate augmented until BA reached the lowest values throughout all samples with both algorithms. This is coincident with the fact that sample *D* was frozen and, consequently, its cells were damaged.

Results obtained for all samples showed a typical response of ripening biological tissues, i.e. a BA diminution as the fruit ages [5]. The observed fluctuations of the curves are related to the characteristic randomness of biospeckle patterns.

Sample *B* presented the highest BA values, being this coincident between both algorithms. This motivated us to assert that sample *B* should be the highest quality fruit among the studied group of strawberries coming from the same stock, i.e. among samples *B*, *C* and *D*. Our assertion is supported by these evidences: (i) sample *C* has a bruised area, which we intentionally located in the region under analysis and effectively resulted in appreciably lower initial BA values, (ii) sample *D* was frozen prior to analysis, which also resulted in slightly lower initial BA values and a quicker diminution of activity as compared to sample *B*, (iii) sample *D*, which was previously frozen, yielded the lowest BA values after an observation period of around 60 h with respect to samples *B* and *C* and (iv) relative errors resulting from BA calculations for sample *B* were lower than those for both samples *C* and *D*. Relative errors resulted systematically higher for BA_1 calculations as compared to BA_2 . The reason for this is that the averaging procedure in (1) takes into account the intensity of all pixels without considering if they changed or not. However, the calculation procedure for BA_2 given in (3) involves an averaging procedure only among those pixels whose intensity varies above a certain threshold value, given by (2). Such high initial BA

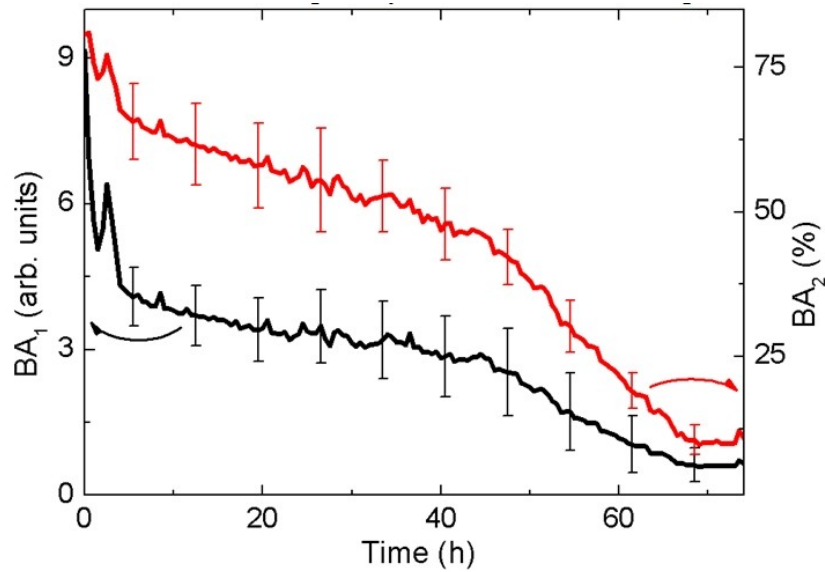


Figure 5. Evolution of BA values for sample *D* (previously frozen) as a function of time, obtained by both methods. The curves presented a higher diminution rate as compared to the other samples. Abrupt decay during the first 5 h was attributed to the defrosting process of the fruit.

values of sample *D* are attributed to the defrosting process of the strawberry (i.e. humidity) rather than to the biological activity of the fruit. Sample *C* also served us, unexpectedly, to infer that fungi colonies could be detected by these methods provided a sufficiently long observation period. In this particular case, a time period of around 24 h was necessary to detect the reversal of the decaying trend in the BA curve (see **Figure 4**). We are currently working on fungi detection by means of dynamic speckle methods [21], however this issue exceeds the aim of the present article and will be further analyzed in future works.

4. CONCLUSION

We have inspected the evolution of the BA of strawberries by means of applying two simple algorithms that were proposed recently [15]. The results obtained from both methods were comparable for all samples and showed a decaying biological activity as a function of time, as was expected. The viability to identify different conservation states of a strawberry has been demonstrated. Both methods allowed distinguishing between good quality fruits (i.e. recently harvested or well preserved) from one that is at an advanced stage of maturation. We have also checked that BA values differ between a healthy area and a damaged or bruised one, which allow inspecting the state of different zones of the same fruit. Moreover, these methods allowed for an early detection of fungi colonies growing onto the surface of the fruit. In conclusion, the results presented in this work allowed us to assert that the employed evaluation methods appear as useful tools for fruit quality assessment. Further research efforts will be pointed towards this issue.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by joint projects of Universidad Tecnológica Nacional, of Argentina, with Universidade da Coruña, of Spain, and CONICET, from Argentina.

References

- [1] T. Kreis, "Holographic Interferometry," in *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*, pp. 35–219, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
- [2] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry (Cambridge Studies in Modern Optics). (2nd Edition)*, vol. 6. Cambridge university press, 1989.
- [3] P. Jacquot, "Speckle Interferometry: A Review of the Principal Methods in Use for Experimental Mechanics Applications," *Strain*, vol. 44, no. 1, pp. 57–69, 2008.
- [4] I. T. Nistea and D. N. Borza, "High speed speckle interferometry for experimental analysis of dynamic phenomena," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, no. 4, pp. 453–459, 2013.
- [5] H. J. Rabal and R. A. Braga Jr, *Dynamic Laser Speckle and Applications*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton Fl. 181-220, 2009.
- [6] J. Lammertyn, A. Peirs, J. De Baerdemaeker, and B. Nicolai, "Light penetration properties of NIR radiation in fruit with respect to non-destructive quality assessment," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 121–132, 2000.
- [7] A. Federico and G. H. Kaufmann, "Evaluation of dynamic speckle activity using the empirical mode decomposition method," *Optics communications*, vol. 267, no. 2, pp. 287–294, 2006.
- [8] M. F. Limia, A. M. Nuñez, H. Rabal, and M. Trivi, "Wavelet transform analysis of dynamic speckle patterns texture," *Applied optics*, vol. 41, no. 32, pp. 6745–6750, 2002.
- [9] J. D. Briers and S. Webster, "Laser speckle contrast analysis: a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow," *Journal of biomedical optics*, vol. 1, no. 2, pp. 174–179, 1996.
- [10] M. Pajuelo, G. Baldwin, H. Rabal, N. Cap, R. Arizaga, and M. Trivi, "Bio-speckle assessment of bruising in fruits," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 40, no. 1, pp. 13–24, 2003.
- [11] E. Da Silva Jr, E. R. T. Da Silva, M. Muramatsu, and S. C. d. S. Lannes, "Transient process in ice creams evaluated by laser speckles," *Food Research International*, vol. 43, no. 5, pp. 1470–1475, 2010.
- [12] A. Kurenda, A. Adamiak, and A. Zdunek, "Temperature effect on apple biospeckle activity evaluated with different indices," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 67, pp. 118–123, 2012.
- [13] I. C. Amaral, R. A. Braga Jr, E. M. Ramos, A. L. S. Ramos, and E. A. R. Roxael, "Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging," *Journal of Food Engineering*, vol. 119, no. 1, pp. 135–139, 2013.
- [14] M. Holzwarth, S. Korhummel, R. Carle, and D. R. Kammerer, "Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (*fragaria* × *ananassa* duch.)," *Food Research International*, vol. 48, no. 1, pp. 241–248, 2012.
- [15] N. Budini, C. Mulone, F. Vincitorio, C. Freyre, A. López, and A. Ramil, "Two simple methods for overall determination of mobility in dynamic speckle patterns," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 124, no. 24, pp. 6565–6569, 2013.
- [16] P. Zakharov, A. Völker, M. Wyss, F. Haiss, N. Calcinaghi, C. Zunzunegui, A. Buck, F. Scheffold, and B. Weber, "Dynamic laser speckle imaging of cerebral blood flow," *Optics express*, vol. 17, no. 16, pp. 13904–13917, 2009.
- [17] R. A. Braga Jr, G. F. Rabelo, L. R. Granato, E. F. Santos, J. C. Machado, R. Arizaga, H. J. Rabal, and M. Trivi, "Detection of fungi in beans by the laser biospeckle technique," *Biosystems engineering*, vol. 91, no. 4, pp. 465–469, 2005.
- [18] A. Zdunek, A. Adamiak, P. M. Pieczywek, and A. Kurenda, "The biospeckle method for the investigation of agricultural crops: A review," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 52, pp. 276–285, 2014.

- [19] R. Arizaga, N. Lucí, M. Trivi, *et al.*, “Display of local activity using dynamical speckle patterns,” *Optical Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 287–294, 2002.
- [20] H. Fujii, K. Nohira, Y. Yamamoto, H. Ikawa, and T. Ohura, “Turbidity and Microbial Risk in Drinking Water,” *Applied Optics*, vol. 26, no. 24, pp. 5321–5325, 1987.
- [21] F. Vincitorio, N. Budini, C. Mulone, M. Spector, C. Freyre, A. L. Díaz, and A. Ramil, “Detection of fungi colony growth on bones by dynamic speckle,” in *8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications*, pp. 8785D2–8785D2, International Society for Optics and Photonics, 2013.